

# **Adaptiver Fehlerschutz in drahtlosen lokalen Netzen zur optimierten Übertragung skalierbar codierter Videodaten**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs**

der Fakultät für Angewandte Informatik

der Universität Augsburg

vorgelegt von:

Dipl.-Ing. Mike Heidrich

2012

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Rudi Knorr

Zweitgutachter: Prof. Dr. Theo Ungerer

Tag der mündlichen Prüfung: 04. Mai 2012

## **Vorwort**

Mein erster und besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Rudi Knorr für die Unterstützung und Ermöglichung dieser Arbeit. Seine Förderung und sein Engagement haben einen sehr wesentlich Beitrag zum Gelingen der Arbeit geleistet, die ich im Rahmen meiner Anstellung bei der von ihm geleiteten Fraunhofer-Einrichtung für Systeme der Kommunikationstechnik ESK anfertigen konnte.

Herrn Prof. Dr. Theo Ungerer danke ich für die Übernahme des Zweitberichts und das damit gezeigte Interesse an der Arbeit sowie seine Bereitschaft auch als Prüfer der mündlichen Prüfung zu fungieren.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. Bernhard Bauer, der in seiner Tätigkeit als Dekan der Fakultät für Angewandte Informatik die Arbeit unterstützt hat und der ebenfalls als Prüfer der mündlichen Prüfung zur Verfügung stand.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Markus Zeller, der ein tiefgreifendes Interesse an der verfolgten Thematik gezeigt hat und dessen konstruktive Anmerkungen und Beiträge mich inspiriert haben, die Arbeit immer weiter voranzutreiben.

Danken möchte ich auch allen Mitarbeitern und Studenten bei der Fraunhofer ESK und der Universität Augsburg, die mich bei der Bearbeitung unterstützt und motiviert haben. Besonders hervorheben möchte ich hier Herrn Josef Jiru und Herrn Sheng Xing für die hilfreichen Beiträge zur Erarbeitung der Simulationsergebnisse, Frau Susanne Baumer für die Übernahme des Lektorats für die Arbeit sowie Frau Sabine Hawpe und Frau Gabi Pröll für die Unterstützung in organisatorischen Belangen.

Ein spezieller Dank gilt meiner ganzen Familie und insbesondere meiner Frau Heike Heidrich, die mir über den gesamten Arbeitszeitraum Verständnis und Geduld entgegengebracht hat und mir eine wichtige Unterstützung war.

Neufahrn bei Freising, Mai 2012



## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt ein neues Verfahren für die adaptive selbstoptimierende Fehlerschutzeinstellung zur Steigerung der Robustheit bei der Übertragung skalierbar codierter Videodaten in drahtlosen lokalen Netzen.

Die Übertragung von Videoinhalten in drahtlosen lokalen Netzen besitzt ein hohes Potential für zukünftige Anwendungen stellt aber auch die Entwicklung innovativer Endgeräte vor neue Herausforderungen. Als Anwendungsszenarien lassen sich ein um Videoübertragung erweiterter Behördenfunk oder die drahtlose Heimvernetzung von Multimediageräten nennen. In beiden Szenarien spielt die Robustheit bei der Übertragung eine wichtige Rolle, da hohe Qualitätsanforderungen an die Videoanwendungen gestellt werden. Der Einsatz der skalierbaren Videocodierung, der durch neue Technologien und Standards effizient möglich ist, bringt zusätzliche Verbesserungen, insbesondere für die Steigerung von Robustheit und Flexibilität, mit sich. Bei dieser Codierung wird das digitale Videosignal durch mehrere aufeinander aufbauende Layer repräsentiert. Jeder Layer kann in einen eigenen Bitstrom codiert und übertragen werden. Der Base Layer besitzt die höchste Bedeutung, da er die grundlegende Qualität beziehungsweise das grundlegende Format beinhaltet. Vorteile, die sich aus der skalierbaren Videocodierung ergeben, sind vor allem die Erhöhung der Robustheit der Videoanwendung bei der Übertragung über Netze mit zeitlich schwankenden Eigenschaften und der flexiblere Einsatz verwendeter Endgeräte. Jedoch entstehen beim Einsatz dieser neuen Technik zusätzliche Anforderungen an die Übertragung in den drahtlosen Netzen, die neue Lösungsansätze erfordern. So werden vor allem geeignete Übertragungsarchitekturen benötigt, die in der Lage sind, die einzelnen Layer-Bitströme entsprechend ihrer Priorität zu transportieren. Eine besondere Herausforderung stellt die Schaffung einer robusten Videoübertragung in einem möglichst großen Anwendungsbereich dar. Zur Steigerung der Robustheit sind Fehlerschutzverfahren einzusetzen, die die Anforderungen der skalierbaren Videocodierung erfüllen können. Zum aktuellen Stand der Technik sind standardbasierte Verfahren, beispielsweise die priorisierte Übertragung in einem WLAN (Wireless Local Area Network) bekannt, die einen Fehlerschutz auf der Basis des ARQ-Protokolls (Automatic Repeat Request) beinhalten. Dabei ist es möglich, die Wirksamkeit dieses Protokolls durch eine adaptive Einstellung der Parametrierung anzupassen. Hierfür fehlte bisher jedoch eine umfassende Modellierung auf deren Basis geeignete Einstellverfahren entworfen werden können.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein Einstellverfahren zu entwerfen, das durch eine selbstoptimierende adaptive Anpassung des ARQ-Fehlerschutzes eine robustere

Übertragung skalierbar codierter Videodaten in drahtlosen lokalen Netzen erlaubt. Bei Einsatz des Verfahrens wird eine Vergrößerung des Anwendungsbereiches der skalierbaren Videoanwendungen erreicht, ohne dass dabei Erweiterungen der Übertragungshardware benötigt werden. Das softwarebasierte Verfahren wird in eine grundlegende Referenzarchitektur eingebettet, die auf Basis geeigneter Anwendungsszenarien konzipiert wird. Hierbei werden insbesondere die Szenarien eines um Videoübertragung erweiterten Behördenfunks und einer drahtlosen Heimvernetzung von Multimediageräten betrachtet, da diese eine hohe Relevanz für den Einsatz von robusten Videoanwendungen besitzen.

Für den Entwurf des Einstellverfahrens ist es erforderlich, eine Referenzarchitektur für die drahtlose Übertragung zu spezifizieren, in die das Verfahren integriert werden kann. Die im Rahmen der Arbeit hierfür vorgestellte Architektur basiert auf einer mehrklassigen priorisierten Übertragung der verschiedenen Layer-Bitströme der skalierbaren Videocodierung. Die Auswahl dieses Ansatzes erfolgte auf der Basis einer erarbeiteten Klassifikationsmethodik anhand der verschiedene Varianten für Architekturen eingeordnet und durch Verfahren zum aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik belegt werden können. Als Architekturvarianten wurden dabei Ende-zu-Ende, Multipfad-Routing sowie die mehrklassige priorisierte Übertragung betrachtet. Auf Basis der Methodik sowie einer Aufstellung von Anforderungen und Randbedingungen wurde eine Bewertung der Architekturansätze durchgeführt und die für die Umsetzung günstigste Architekturvariante ausgewählt. In der vorgestellten Referenzarchitektur wird eine Kombination des Scheduling der Prioritätsklassen mit dem Medienzugriffsverfahren vorgesehen. Hieraus ergeben sich mehrere Vorteile. Zum einen kann ein höherer Gesamtdurchsatz in einem Knoten des Netzwerkes erreicht werden, zum anderen erfolgt eine durchgängige Priorisierung der verschiedenen Klassen bis auf die Ebene des Medienzugriffs. Anhand eines simulativen Vergleiches des gewählten Scheduling-Ansatzes mit einem PQ (Priority Queueing) Scheduler in einer Station können diese Vorteile am Beispiel von WLAN nach IEEE 802.11 quantitativ nachgewiesen werden. So lässt sich eine Steigerung des Gesamtdurchsatzes um 20% gegenüber dem PQ Scheduler in der Station aufzeigen.

Der Kern der Arbeit liegt im Entwurf des selbstoptimierenden adaptiven Einstellverfahrens SORA (Self Optimizing Retry Adaptation) für den ARQ-Fehlerschutz. Auf Basis eingehender simulativer Analysen des Fehler- und Lastverhaltens kann aufgezeigt werden, dass in der spezifizierten Referenzarchitektur Potential für die Steigerung der Robustheit durch Erweiterung des ARQ-Protokolls um eine adaptive Einstellung besteht. Bei dem ARQ-Protokoll, das auf der Wiederholung fehlerhaft übertragener Pakete basiert, erfolgt die Festlegung der Wirksamkeit des Fehlerschutzes durch Einstellung des Retry Limits. Dieser Parameter gibt an, wie viele Übertragungswiederholungen für ein Paket erlaubt sind.

Die Anpassung des Retry Limits muss bei einer adaptiven Einstellung so erfolgen, dass bei der Übertragung eine minimale resultierende Paketfehlerrate erreicht wird. Dabei ist zu beachten, dass sich diese Fehlerrate sowohl aus Übertragungsverlusten des drahtlosen Kanals als auch aus Verlusten durch Überlastung in den Netzschnittstellen zusammensetzt. Aufgrund der Tatsache, dass bei Wiederholungen fehlerhafter Pakete die verfügbare Bandbreite beeinflusst wird, besteht zwischen beiden Verlustarten ein Zusammenhang. Für den Entwurf einer geeigneten Einstellstrategie ist es erforderlich, eine analytische Betrachtung durchzuführen, die eine Aussage liefert, unter welchen Bedingungen die angestrebte minimale Paketfehlerrate erreicht werden kann. Hierfür wird im Rahmen der Arbeit der aus der Literatur bekannte Ansatz des Fluid Modelings verwendet. Es wird ein geeigneter Modellansatz aufgestellt, interpretiert und durch Simulationen validiert. Als wesentlicher Beitrag im Vergleich zu bisherigen Arbeiten kann auf Basis der durchgeführten Untersuchungen gezeigt werden, dass eine optimale Einstellung immer dann gegeben ist, wenn eine hohe Gewichtung der Übertragungsverluste gegenüber den Lastverlusten erfolgt. Diese Erkenntnis wird für den Entwurf eines neuartigen Einstellverfahrens genutzt. Es kann weiterhin gezeigt werden, dass der gewählte Ansatz gleichzeitig zu einer grundlegenden Vereinfachung der Fehlerschutzeinstellung führt, da diese für eine mehrklassige priorisierte Übertragung einheitlich für alle Klassen erfolgen kann. Daraus resultiert eine signifikante Reduzierung des Aufwandes für die softwarebasierte Implementierung des Einstellverfahrens. Auf Basis von Simulationen kann die Funktionsweise des entworfenen Einstellverfahrens nachgewiesen werden, wobei beide betrachteten Varianten des Scheduling der Prioritätsklassen berücksichtigt wurden.

Für das neue selbstoptimierende adaptive Einstellverfahren wurde eine umfassende simulative Leistungsbewertung unter normalen und extremen Betriebssituationen durchgeführt. Hierfür wurden verschiedene Testreihen spezifiziert. Es kann durch die Leistungsbewertung gezeigt werden, dass unter normalen Betriebsbedingungen eine mittlere Verbesserung der Robustheit des Base Layers von 1,5% und in den Extremsituationen eine Verbesserung um bis zu 13% gegenüber den verwendeten Referenzszenarien erreicht werden kann. Bei der Absicherung einer minimalen Robustheit liegt das neue Verfahren in den durchgeführten Testreihen um 14% über dem Standardverfahren. Bei der durchgeführten Leistungsbewertung kann nur durch das neue Verfahren in allen Fällen des Normalbetriebes eine Robustheit von über 97% erreicht werden, was die Anforderungen an eine qualitative Videoübertragung ausreichend erfüllt.

Das vorgeschlagene Einstellverfahren lässt sich in einem WLAN konform zu dem Standard IEEE 802.11e realisieren. Die Implementierung kann softwarebasiert erfolgen

## VIII

ohne dass dabei Hardwareerweiterungen, zum Beispiel spezielle Antennen, vorausgesetzt werden.

Für zukünftige Forschungsarbeiten kann das vorgestellte Verfahren als Baustein für den Aufbau von Cross Layer Übertragungsarchitekturen verwendet werden, die eine übergreifende, nach mehreren Kriterien optimierte Videoübertragung in drahtlosen lokalen Netzen erlauben.



## Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	III
Kurzfassung .....	V
Inhaltsverzeichnis .....	IX
Abbildungsverzeichnis .....	XIII
Tabellenverzeichnis .....	XVII
Abkürzungsverzeichnis .....	XIX
Symbolverzeichnis .....	XXV
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation und Motivation .....	1
1.2 Anwendungsszenarien und Handlungsbedarf .....	3
1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit .....	7
<b>2 Übertragung skalierbar codierter Videodaten in drahtlosen lokalen Netzen 11</b>	
2.1 Einleitung .....	11
2.2 Grundlagen und Begriffe .....	11
2.2.1 Wichtige Begriffe .....	11
2.2.2 Definition eines digitalen Videoübertragungssystems .....	12
2.2.3 Skalierbare Videocodierung .....	14
2.2.4 Drahtlose lokale Vernetzung .....	25
2.2.5 Zusammenfassung und Fazit .....	33
2.3 Anforderungen bei der Übertragung skalierbar codierter Videodaten .....	34
2.3.1 Allgemeine Anforderungen der digitalen Videoübertragung .....	34
2.3.2 Besonderheiten bei der Übertragung skalierbar codierter Videodaten .....	35
2.3.3 Netz- und systemspezifische Anforderungen .....	37
2.4 Bewertungskriterien .....	39
2.4.1 Bewertungskriterien der Videoebene .....	39
2.4.2 Bewertungskriterien der Netzebene .....	44
2.4.3 Zusammenfassung und Fazit .....	47
2.5 Stand der Wissenschaft und Technik .....	47

2.5.1	Einordnung und Systematisierung.....	47
2.5.2	Ende-zu-Ende Verfahren .....	49
2.5.3	Verfahren auf Basis von Multipfad-Routing.....	52
2.5.4	Verfahren auf der Basis mehrklassiger priorisierter Übertragung.....	54
2.5.5	Bewertung und Fazit.....	57
2.6	Zusammenfassung und Fazit.....	59
<b>3</b>	<b>Analysen für eine adaptive Fehlerschutzeinstellung .....</b>	<b>61</b>
3.1	Einleitung.....	61
3.2	Referenzarchitektur auf Basis mehrklassiger priorisierter Übertragung.....	62
3.2.1	Konzeption einer Referenzarchitektur.....	62
3.2.2	Teilkomponenten der Videoebene.....	66
3.2.3	Multi-hop Routing .....	67
3.2.4	Spezifikation der mehrklassigen priorisierten Übertragung.....	67
3.2.5	Einführung einer selbstoptimierenden adaptiven Fehlerschutz-einstellung.....	73
3.2.6	Zusammenfassung und Fazit .....	75
3.3	Simulative Detailanalyse für eine adaptive Fehlerschutzeinstellung.....	75
3.3.1	Auswahl relevanter Referenzverfahren .....	75
3.3.2	Methodik und Kriterien für eine Detailanalyse .....	76
3.3.3	Analyseergebnisse des Standardverfahrens nach IEEE 802.11e.....	78
3.3.4	Analyseergebnisse des RTRA Verfahrens .....	78
3.3.5	Bewertung der Analyseergebnisse.....	79
3.3.6	Zusammenfassende Bewertung der Referenzverfahren .....	81
3.4	Zusammenfassung und Fazit.....	82
<b>4</b>	<b>Vorschlag eines neuen Verfahrens zur adaptiven Fehlerschutzeinstellung .</b>	<b>85</b>
4.1	Einleitung.....	85
4.2	Analyse und Modellbildung.....	86
4.2.1	Analyse des ARQ-Protokolls in drahtlosen lokalen Netzen.....	86
4.2.2	Modellbildung für eine optimale Einstellung des Retry Limits .....	90
4.2.3	Diskussion des Modellansatzes und der Optimierungslösungen.....	93
4.2.4	Fazit für den Entwurf eines selbstoptimierenden Fehlerschutzes .....	97

4.3	Neues adaptives Verfahren zur selbstoptimierten Einstellung des Fehlerschutzes.....	98
4.3.1	Problemstellung und Anforderungen.....	98
4.3.2	Vorschlag des neuen Einstellverfahrens SORA .....	98
4.3.3	Zusammenfassung und Fazit.....	102
4.4	Adaptive Einstellung des Fehlerschutzes bei einer Übertragung mit mehreren Prioritätsklassen .....	102
4.4.1	Einleitung und Problemstellung.....	102
4.4.2	Variante 1: Kombination des SORA-Einstellverfahrens mit einem PQ Scheduler.....	102
4.4.3	Abgrenzung der Einstellung eines priorisierten Fehlerschutzes zum RTRA Verfahren .....	104
4.4.4	Variante 2: Kombination des SORA-Einstellverfahrens mit einem MAC Scheduler.....	108
4.4.5	Implementierungsaspekte .....	111
4.4.6	Bewertung und Fazit.....	112
4.5	Zusammenfassung und Fazit.....	112
<b>5</b>	<b>Leistungsbewertung des neuen Verfahrens .....</b>	<b>115</b>
5.1	Einleitung .....	115
5.2	Simulationsumgebung für die Leistungsbewertung.....	116
5.3	Verhalten auf der Netzebene .....	117
5.3.1	Beschreibung der Testmethodik .....	117
5.3.2	Ergebnisse für das Fehlerverhalten.....	119
5.3.3	Ergebnisse für das Lastverhalten .....	121
5.3.4	Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse und Fazit.....	122
5.4	Verhalten auf der Videoebene unter Normalbedingungen.....	124
5.4.1	Testmethodik.....	124
5.4.2	Bewertung der im Mittel erreichten Ergebnisse .....	127
5.4.3	Diskussion der Ergebnisse der Einzeltestreihen .....	127
5.4.4	Zusammenfassung und Fazit.....	131
5.5	Verhalten auf der Videoebene in Extremsituationen .....	131
5.5.1	Testmethodik.....	131
5.5.2	Bewertung der im Mittel erreichten Ergebnisse .....	131

5.5.3 Diskussion der Ergebnisse der Einzeltestreihen .....	132
5.5.4 Zusammenfassung und Fazit .....	135
5.6 Bewertung hinsichtlich der Anwendungsanforderungen .....	135
5.7 Abschließende Bewertung und Gesamtfazit .....	136
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>141</b>
6.1 Zusammenfassung der Inhalte und Ergebnisse .....	141
6.2 Vorschläge für Erweiterungen und Ausblick .....	144
6.2.1 Intelligente Kollisionserkennung in drahtlosen lokalen Netzen .....	145
6.2.2 Aktives Warteschlangenmanagement .....	146
6.2.3 Einbindung in eine Cross-Layer Architektur für multi-hop Netze .....	147
<b>A Anhang .....</b>	<b>149</b>
A.1 Medienzugriffsverfahren nach IEEE 802.11e .....	149
A.2 Einsatz des ARQ-Protokolls im Standard IEEE 802.11 .....	152
A.3 Aufbau der Simulationsumgebung zur Analyse und Leistungsbewertung .....	155
A.3.1 Gesamtkonzept der Simulationsumgebung .....	155
A.3.2 Simulation der Videoebene .....	155
A.3.3 Simulation der Netzebene und der drahtlosen Übertragung .....	156
A.4 Konfiguration der Verifikationstests auf der Netzebene .....	159
A.4.1 Testreihen zur Auswertung des Fehlerverhaltens .....	159
A.4.2 Testreihen zur Auswertung des Lastverhaltens .....	159
A.5 Konfiguration der Verifikationstests auf der Videoebene .....	162
A.5.1 Konfiguration der Testreihen der Videoebene im Normalbetrieb .....	162
A.5.2 Konfiguration der Testreihen der Videoebene in Extremsituationen .....	163
<b>Glossar .....</b>	<b>165</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>172</b>
<b>Lebenslauf .....</b>	<b>187</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Entwicklung mobiler Informations- und Kommunikationsdienste .....	1
Abbildung 1.2: Produktbeispiel HiMoNN [27] .....	4
Abbildung 1.3: Drahtlose Vernetzung im Heimbereich nach [46] .....	5
Abbildung 2.1: Digitales paketbasiertes Videoübertragungssystem .....	14
Abbildung 2.2: Digitale Übertragungskette für Videoinformationen mit Videocodierung .....	15
Abbildung 2.3: Hybride Encoderstruktur am Beispiel H.264/AVC [130] .....	16
Abbildung 2.4: Struktur des Encoders nach H.264 AVC .....	17
Abbildung 2.5: Vergleich (a) nichtskalierbare und (b) skalierbare Codierung .....	19
Abbildung 2.6: Layered Coding für qualitative Skalierung .....	21
Abbildung 2.7: Struktur des Encoders nach H.264 SVC [132] .....	23
Abbildung 2.8: Anordnung der FGS Daten im SVC Bitstrom [132] .....	24
Abbildung 2.9: Skalierung von Videoqualität und Datenrate .....	24
Abbildung 2.10: Paketfehlerrate (a: Bitfehlerabhängigkeit b: Routingeinflüsse) .....	29
Abbildung 2.11: Grundprinzip Stop-and-Wait ARQ .....	31
Abbildung 2.12: Getrennte Übertragung skalierbar codierter Bitströme .....	36
Abbildung 2.13: Netztopologie .....	39
Abbildung 2.14: Lauflängen verschiedener Videolayer .....	43
Abbildung 2.15: Ableitung von Anforderungen für die Netzebene .....	46
Abbildung 2.16: Einordnung von Architekturansätzen .....	48
Abbildung 2.17: Architektur der Ende-zu-Ende Verfahren .....	49
Abbildung 2.18: Unequal Error Protection auf Paketebene .....	50
Abbildung 2.19: Architektur des Verfahrens nach Zhang [141] .....	51
Abbildung 2.20: Architektur von Cross-Layer Multipfad Routing Verfahren .....	52
Abbildung 2.21: Prinzip des Verfahrens nach Mao [69] .....	53
Abbildung 2.22: Architektur für eine mehrklassige priorisierte Übertragung .....	54
Abbildung 2.23: Übertragung skalierbar codierter Videodaten mit IEEE 802.11e nach [58] .....	55
Abbildung 2.24: Architektur mit RTRA Verfahren nach [64] .....	57
Abbildung 3.1: Übertragungskette für skalierbar codierte Videodaten .....	63

Abbildung 3.2: Gesamtkonzept und Einordnung des Architekturentwurfs .....	65
Abbildung 3.3: Architektur der Netzschnittstelle mit Scheduling im MAC .....	69
Abbildung 3.4: Architektur der Netzschnittstelle mit PQ Scheduler .....	71
Abbildung 3.5: Durchsatzvergleich (a: MAC Scheduler, b: PQ Scheduler).....	72
Abbildung 3.6: Selbstoptimierende Arbeitsweise der Netzschnittstellen .....	74
Abbildung 3.7: Ergebnisse des (a) Fehler- und (b) Lastverhaltens für IEEE 802.11e.....	78
Abbildung 3.8: Ergebnisse des (a) Fehler- und (b) Lastverhaltens für RTRA .....	79
Abbildung 4.1: Statistische Verteilung der Sendewiederholungen.....	87
Abbildung 4.2: Mittlere Anzahl der benötigten Sendeveruche für $L_r = 20$ .....	87
Abbildung 4.3: Verhalten der Übertragungsverzögerung .....	89
Abbildung 4.4: Modell einer Netzschnittstelle mit ARQ-Protokoll nach IEEE 802.11 ....	90
Abbildung 4.5: Verhalten der Verlustraten für verschiedene Werte von $\lambda/\mu$ (a:1,0; b:0,8 ) .....	94
Abbildung 4.6: Verhalten der Gesamtverlustrate und der ersten Ableitung.....	95
Abbildung 4.7: Verhalten der Verlustraten simulativ (a: 2048 kbit/s, b: 4096 kbit/s).....	96
Abbildung 4.8: Ansatz und Abgrenzung des neuen Einstellverfahrens für $L_{r\,opt}$ .....	99
Abbildung 4.9: Berechnung der Retry Limits für verschiedene Werte von $p_{l_s}$ .....	99
Abbildung 4.10: Algorithmus zur Ermittlung von $L_{r\,opt}$ .....	100
Abbildung 4.11: Vergabe von $L_{r\,opt}$ (a) und resultierendes Verhalten von $p_l$ und $p_b$ (b) .....	101
Abbildung 4.12: Integration des SORA-Verfahrens beim Einsatz des PQ Schedulers ....	103
Abbildung 4.13: Fehler- und Lastverhaltens beim Einsatz eines PQ Schedulers .....	104
Abbildung 4.14: Zentrale Einstellung des priorisierten Fehlerschutzes in zwei Schritten	105
Abbildung 4.15: Verhalten von $L_{r\,Shadow}$ in Abhängigkeit von der Verkehrslast.....	106
Abbildung 4.16: Verlauf der systemweiten mittleren Anzahl der Sendeveruche .....	107
Abbildung 4.17: Verteilung der Retry Limits auf die Klassen .....	107
Abbildung 4.18: Verteiltes Scheduling in einem drahtlosen Netz nach IEEE 802.11e ....	109
Abbildung 4.19: Integration des SORA-Verfahrens beim Einsatz eines MAC Schedulers .....	110
Abbildung 4.20: Fehler- und Lastverhaltens beim Einsatz eines MAC Schedulers .....	111

Abbildung 4.21: Integration des SORA-Verfahrens in die MAC-Implementierung .....	111
Abbildung 5.1: Schematischer Aufbau der Simulationsumgebung .....	117
Abbildung 5.2: Beispielhafte Auswertung eines Tests.....	119
Abbildung 5.3: Robustheitsverteilung der Einzeltestreihen.....	128
Abbildung 5.4: Verteilung der Verzögerung der Einzeltestreihen.....	128
Abbildung 5.5: Übertragungsverzögerungen der Prioritätsklassen.....	129
Abbildung 5.6: PSNR Verteilung der Einzeltestreihen.....	130
Abbildung 5.7: $\sigma_Q$ -Verteilung der Einzeltestreihen.....	130
Abbildung 5.8: Robustheitsverteilung der Einzeltestreihen.....	132
Abbildung 5.9: Verteilung der Verzögerung der Einzeltestreihen.....	133
Abbildung 5.10: Übertragungsverzögerungen der Prioritätsklassen.....	133
Abbildung 5.11: PSNR Verteilung der Einzeltestreihen.....	134
Abbildung 5.12: $\sigma_Q$ -Verteilung der Einzeltestreihen.....	135
Abbildung 6.1: Allgemeiner Aufbau einer Cross Layer Architektur .....	147





## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Videocodierstandards .....	17
Tabelle 2-2: Eigenschaften und Anwendungen drahtloser Vernetzungsstandards .....	32
Tabelle 2-3: Bewertungskriterien .....	40
Tabelle 2-4: Erweiterte Qualitätskriterien für skalierbares Video.....	41
Tabelle 2-5: Bewertung verschiedener Architekturansätze.....	58
Tabelle 3-1: Parametrierung nach IEEE 802.11e .....	70
Tabelle 3-2: Zusammenfassender Vergleich der Architekturvarianten.....	73
Tabelle 3-3: Parametrierung für die Detailanalysen.....	77
Tabelle 3-4: Konfidenzintervalle der Simulation des Fehlerverhaltens für IEEE 802.11e. 80	
Tabelle 3-5: Konfidenzintervalle der Simulation des Lastverhaltens für IEEE 802.11e ....	80
Tabelle 3-6: Bewertung der Referenzverfahren .....	82
Tabelle 5-1: Vergleichsgrade zur Auswertung der Testreihen der Netzebene.....	119
Tabelle 5-2: Beispielhafte Ergebnisse für einen Einzeltest.....	119
Tabelle 5-3: Ergebnisse für die Robustheit .....	120
Tabelle 5-4: Ergebnisse für die Maximalleistung.....	120
Tabelle 5-5: Ergebnisse für die Robustheit (in kbit/s).....	121
Tabelle 5-6: Ergebnisse für die Maximalleistung (in kbit/s).....	122
Tabelle 5-7: Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse auf der Netzebene.....	123
Tabelle 5-8: Charakteristik und Parametrierung der Videosequenzen.....	125
Tabelle 5-9: Durchschnittliche Ergebnisse der Videoebene unter Normalbedingungen ..	127
Tabelle 5-10: Ergebnisse der Videoebene in Extremsituationen.....	132
Tabelle 5-11: Gesamtbewertung der Netzebene.....	137



## Abkürzungsverzeichnis

AC	Access Category
ACK	Acknowledgement
ACTA	Allensbacher Computer- und Technik-Analyse
AIFS	Arbitrated Interframe Space
AODV	Ad-hoc On-demand Distance Vector
AOMDV	Ad-hoc On-demand Multipath Distance Vector
ARQ	Automatic Repeat-reQuest
AVC	Advanced Video Coding
BAN	Body Area Network
BER	Bit Error Rate
BL	Base Layer
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BSS	Basic Service Set
CA	Collision Avoidance
CBR	Constant Bitrate
CCK	Complementary Code Keying
CFP	Contention Free Period
CGS	Coarse Granularity Scalability
CIF	Common Intermediate Format
CP	Contention Period

XX

CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CTS	Clear To Send
CW	Contention Window
dB	Dezibel
dBm	Dezibel Milliwatt
DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying
DCF	Distributed Coordination Function
DCT	Diskrete Cosinus Transformation
DIFS	DCF Interframe Space
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
EL	Enhancement Layer
ESS	Extended Basic Service Set
FBAS	Farb-Bild-Austast-Synchron-signal
FCS	Frame Check Sequence
FEC	Forward Error Correction
FGS	Fine Granularity Scalability
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
GBN	Go-Back-N
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
HC	Hybrid Coordinator

HCCA	HCF Controlled Channel Access
HCF	Hybrid Coordination Function
IBSS	Independent Basic Service Set
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFS	Interframe Space
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ISO	International Organization for Standardization
ITU-T	International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector
JPEG	Joint Photographic Experts Group
JSCC	Joint Source-Channel Coding
JVT	Joint Video Team
LAN	Local Area Network
LC	Layered Coding
MAC	Media Access Controller
MAD	Mean Absolute Difference
MAN	Metropolitan Area Network
MANET	Mobile Ad Hoc Network
MDC	Multiple Description Coding
MPEG	Motion Picture Experts Group
MSE	Mean Square Error

## XXII

NAK	Negative Acknowledgement
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OSI	Open Systems Interconnection
PAN	Personal Area Network
PC	Point Coordinator
PCF	Point Coordination Function
PER	Packet Error Rate
PFGS	Progressive Fine Granularity Scalability
PHY	Physical Layer Protocol
PIFS	PCF Interframe Space
PQ	Priority Queueing
PSNR	Peak Signal to Noise Ratio
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QCIF	Quarter Common Intermediate Format
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RFC	Request for Comment
RTP	Realtime Transport Protocol
RTRA	Realtime Retry Adaptation
RTS	Ready To Send
SIFS	Short Interframe Space
SNR	Signal to Noise Ratio

SORA	Self Optimizing Retry Adaptation
SPIHT	Set Partitioning Into Hierarchical Trees
SR	Selective Repeat
SVC	Scalable Video Coding
SW	Stop-and-Wait
TC	Traffic Category
TCP	Transmission Control Protocol
TSB	Temporal Subband Coding
TXOP	Transmission Opportunity
UDP	User Datagram Protocol
UEP	Unequal Error Protection
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VBR	Variable Bitrate
VBV	Video Buffer Verifier
VCEG	Video Coding Experts Group
WAN	Wide Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network, auch Wireless LAN
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WMM	Wi-Fi Multimedia
WMN	Wireless Mesh Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WWAN	Wireless Wide Area Network





## Symbolverzeichnis

### Variablen mit römischen Buchstaben

$A$	Maximaler Energiewert eines Pixels
$B_e$	Bitfehlerrate (BER) der physikalischen Übertragung
$C$	Kapazität der physikalischen Übertragung [Rahmen/s]
$CW$	Contention Window
$E_{MSE}$	Mittlerer quadratischer Fehler (MSE)
$i$	Klassenindex, Bitstromindex
$j$	Index der Sendeversuche
$J$	Exakte Anzahl der benötigten Sendeversuche
$\bar{J}$	Mittlere Anzahl der benötigten Sendeversuche
$k$	Index für Videoframes
$K$	Gesamtanzahl Videoframes in einer Sequenz
$L_C$	Anzahl der Klassen
$L_P$	Länge eines Pakets oder Rahmens [Bits]
$L_r$	Maximale Anzahl der erlaubten Sendewiederholungen (Retry Limit)
$L_{r_i}$	Retry Limit der Klasse $i$
$L_{r_{Shadow}}$	Shadow Retry Limit (RTRA Verfahren)
$m$	Pixelindex waagrecht
$M$	Waagerechte Größe eines Videoframes [Pixel]
$n$	Pixelindex senkrecht
$n_A$	Index für arbitrierte Dauer zwischen zwei Rahmen (AIFSN) [s]
$n_{f_{Base}}$	Anzahl robust übertragener Videoframes
$n_{f_{ges}}$	Anzahl insgesamt gesendeter Videoframes
$n_{Mess}$	Anzahl durchgeführter Messungen

$n_{P_{Fehler}}$	Anzahl verlorener oder fehlerhafter Pakete
$n_{P_{ges}}$	Anzahl gesendeter Pakete
$N$	Senkrechte Größe eines Videoframes [Pixel]
$p_L$	Paketfehlerrate der physikalischen Übertragung nach Fehlerschutz
$p_B$	Paketfehlerrate einer Warteschlange
$p_{ges}$	Gesamte Paketfehlerrate nach Fehlerschutz
$P$	Parameter für statistische Sicherheit
$P_e$	Paketfehlerrate der physikalischen Übertragung
$P_{PER}$	Paketfehlerrate (PER) allgemein
$\bar{P}_{PER}$	Mittelwert der Paketfehlerrate
$P_{PER_{gu}}$	Untere Grenze des Konfidenzintervalls der Paketfehlerrate
$P_{PER_{go}}$	Obere Grenze des Konfidenzintervalls der Paketfehlerrate
$Q$	Qualität eines Videoframes (PSNR)
$r$	Laufweitenmaß für Videoframes
$r_f$	Rate robust übertragener Videoframes [%]
$s_{PER}$	Streuung der Paketfehlerrate
$t_{m;q}$	Quantil der Studentschen t-Verteilung der Ordnung q mit m Freiheitsgraden
$t_{tx}$	Gesamtdauer zum Senden eines Datenrahmens [s]
$t_A$	Arbitrierte Dauer zwischen zwei Rahmen (AIFS, DIFS) [s]
$t_{ACK}$	Dauer zum Senden eines Acknowledgements [s]
$t_B$	Backoffdauer [s]
$t_D$	Garantierte Sendedauer (TXOP) [s]
$t_{Data}$	Dauer zum Senden eines Datenrahmens [s]

$t_{P\bar{U}}$	Gesamtdauer einer Paketübertragung [s]
$t_Q$	Verweildauer in einer Warteschlange [s]
$t_S$	Kürzeste Dauer zwischen zwei Rahmen (SIFS) [s]
$t_{Slot}$	Slotdauer [s]
$t_W$	Dauer des Wartens einer Station bis zum Sendebeginn [s]
$x$	Energiewert eines Pixels
$y$	Energiewert eines Pixels

### Variablen mit griechischen Buchstaben

$\Delta$	Verzögerung
$\varepsilon$	Maximalwert der erlaubten Paketfehlerrate
$\lambda$	Empfangsrate einer Warteschlange allgemein
$\lambda_i$	Empfangsrate der Warteschlange für Klasse i
$\lambda_{ges}$	Empfangsrate aller Warteschlangen
$\mu$	Servicerate einer Warteschlange allgemein
$\mu_i$	Servicerate der Warteschlange für Klasse i
$\mu_{ges}$	Servicerate aller Warteschlangen
$\sigma_M$	Varianz des mittleren quadratischen Fehlers
$\sigma_Q$	Varianz der Qualität

### Mathematische Schreibweisen

$\lceil x \rceil$	kleinste ganze Zahl, die größer oder gleich $x$ ist
-------------------	---



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation und Motivation

Mobile Kommunikation und Multimedia-Anwendungen haben im vergangenen Jahrzehnt ein rasantes Wachstum erlebt. Beispielsweise ist einer ACTA-Studie zufolge die Zahl der Mobilfunknutzer in Deutschland von 9,3 Mio. im Jahr 1998 auf 44,3 Mio. im Jahr 2007 gestiegen [9]. Das sind 89% des Anteils der Bevölkerung im Alter zwischen 14 und 64 Jahren. In den nächsten Jahren ist, wie in der Abbildung 1.1 dargestellt, eine verstärkte Verschmelzung von mobiler Kommunikation und multimedialen Diensten zu erwarten [6] [81]. Dies führt langfristig zu einer allgegenwärtigen Multimedia-Kommunikation, bei der die Nutzung von beliebigen Diensten zu jeder Zeit an jedem Ort möglich ist. Neben dem öffentlichen Mobilfunk spielen heute im Bereich der Vernetzung immer mehr auch lokale drahtlose Technologien eine tragende Rolle.



Abbildung 1.1: Entwicklung mobiler Informations- und Kommunikationsdienste

Gleichfalls gewinnen für die Realisierung multimedialer Dienste Codier-Technologien, wie die digitale Videocodierung weiter an Bedeutung. Als ein heute sehr wichtiger technologischer Treiber ist hier insbesondere die skalierbare Videocodierung zu nennen, da sie höhere Robustheit und mehr Flexibilität für eine Vielzahl von Videoanwendungen erlaubt. Die Forderung nach Skalierbarkeit besitzt in der Videocodierung eine lange Historie. In den verschiedenen Standardisierungen für die Videocodierung wurde versucht, Skalierbarkeit bei der Codierung des Videosignals zu berücksichtigen [39] [40] [42]. Die Motivation für skalierbare Videocodierung liegt im universellen Einsatz der Bitströme für heterogene Anwendungsszenarien und Übertragungsmedien. Ein wesentlicher Nachteil skalierbarer Videocodierv Verfahren war in der Vergangenheit die mangelnde Codiereffizienz gegenüber nichtskalierbaren Codierv Verfahren. Mit der Standardisierung von H.264 SVC [88] ergibt sich erstmals die Möglichkeit einer kommerziellen Umsetzung der skalierbaren Videocodierung, da der Standard die Effizienzprobleme [131] früherer Ansätze überwindet. Die Einsatzbereiche skalierbarer Videocodierung sind durch die hohe Flexibilität sehr vielfältig, angefangen von der Unterhaltungsindustrie über die Telekommunikation bis hin zur Gebäudeüberwachung [92]. Insbesondere bietet die skalierbare Codierung einen sehr guten Ansatz zur Steigerung der Robustheit von Videoanwendungen. Allerdings sind dabei sehr spezifische Anforderungen an die Übertragung zu beachten, da durch die skalierbare Videocodierung ein komplexer Bitstrom entsteht, der sich aus mehreren, aufeinander aufbauenden Layern zusammensetzt. Um dies für robustere Videoanwendungen auszunutzen, muss bei der Übertragung sichergestellt werden, dass Layer mit hoher Priorität auch unter sich verschlechternden Bedingungen im Netzwerk übertragen werden.

Im Bereich der Netzwerke ist die ständige Weiterentwicklung und Verbreitung der drahtlosen Vernetzung ein wichtiger Trend. Neben den heute bekannten Mobilfunktechnologien GSM und UMTS haben in den vergangenen Jahren insbesondere lokale drahtlose Netze stärker an Bedeutung gewonnen. Im Hinblick auf eine zukünftige allgegenwärtige Kommunikationsinfrastruktur, ist zu erwarten, dass drahtlosen lokalen Netzen eine immer größere Bedeutung für die mobile Vernetzung zukommt [72] [73]. Drahtlose lokale Netze existieren in verschiedenen Ausprägungsformen. Angefangen von den Wireless Local Area Networks (WLAN) im Gebäude- und Außenbereich über Wireless Personal Area Networks (WPAN) in der direkten Umgebung des Menschen bis hin zu Sensornetzen und Body Area Networks. Damit eine Interoperabilität zwischen verschiedensten Produkten in diesem Bereich gewährleistet werden kann, werden durch einschlägige Standardisierungsgremien, wie zum Beispiel die IEEE, die Verfahren und

Protokolle für den Datenaustausch standardisiert. Beispiele für solche Standards sind IEEE 802.11a [30], IEEE 802.11b [31] und IEEE 802.11g [32] für WLAN oder IEEE 802.15.3 [33] und IEEE 802.15.4 [36] für WPAN. Die drahtlose Vernetzung bringt gegenüber der leitungsgebundenen Kommunikation eine Reihe von Vorteilen. Durch den Wegfall der Verkabelung werden sowohl eine mobile Nutzung als auch eine Vereinfachung bei der Inbetriebnahme von Endgeräten erreicht. Speziell im mobilen Einsatz ergeben sich neue Anwendungsszenarien. Aufgrund ihrer physikalischen Randbedingungen besitzen drahtlose Netze jedoch auch eine Reihe spezifischer Übertragungseigenschaften, die sie von drahtgebundenen Netzen unterscheidet. So ist neben einer hohen Signaldämpfung auch die Mehrwegeausbreitung bei der physikalischen Übertragung zu berücksichtigen, die zu Interferenzen und damit zu spezifischen Übertragungseigenschaften wie einer vergleichsweise hohen Bitfehlerrate führt [85]. Beim Medienzugriff ist immer von einem gemeinsam genutzten Medium auszugehen, was spezielle Zugriffsverfahren erfordert und zum Teil auch zu Kollisionen führen kann. Derartige Eigenschaften wirken sich maßgeblich auf die erreichbare Qualität der Datenübertragung aus und erfordern speziell angepasste Übertragungsverfahren und Kommunikationsprotokolle für drahtlose Netze.

Betrachtet man den Ansatz der skalierbaren Videocodierung und die drahtlose lokale Vernetzung in einem Zusammenhang, ergibt sich zum aktuellen Zeitpunkt die Fragestellung, inwieweit eine möglichst optimale Übertragung skalierbar codierter Videodaten in drahtlosen lokalen Netzen erreichbar ist. Weiterhin ist es für die spätere Realisierung einer derartigen Übertragung von hohem Interesse, welche Verfahren und Protokolle für eine optimale Anpassung der Anforderungen der Übertragung skalierbar codierter Videodaten an die spezifischen Übertragungseigenschaften in drahtlosen lokalen Netzen benötigt werden. Zuvor ist es jedoch erforderlich, eine Analyse möglicher Anwendungsszenarien durchzuführen um daraus konkrete Problemstellungen abzuleiten.

## **1.2 Anwendungsszenarien und Handlungsbedarf**

Die Einsatzmöglichkeiten der skalierbaren Videocodierung in Verbindung mit drahtlosen lokalen Netzen können an zwei Anwendungsszenarien veranschaulicht werden, die stellvertretend für die Ableitung von Anforderungen herangezogen werden können. Es handelt sich dabei um einen um Videoübertragung erweiterten Behördenfunk und die drahtlose Multimediaübertragung im Heimbereich.

Das erste Beispielszenario ist ein um Videoübertragung erweiterter Behördenfunk auf Basis lokaler drahtloser Vernetzung. Behörden und Organisationen mit

Sicherheitsaufgaben (BOS) verwenden für ihre Einsätze spezielle Kommunikationssysteme. Heute ist das digitale TETRA-Funknetz [102] bekannt, das dem Mobilfunk zuzuordnen ist. Für bestimmte Einsatzzwecke, zum Beispiel Großveranstaltungen, ist es sinnvoll, das bestehende TETRA-Netz um autarke lokale drahtlose Netze zu ergänzen, da dies zusätzliche Videoanwendungen ermöglicht. Ein Beispielprodukt, das bereits heute am Markt ist, ist die Lösung HiMoNN der Firma IABG [27], die in der Abbildung 1.2 dargestellt ist. Ein vergleichbarer Ansatz ist das asiatische DUMBONET [48], das speziell für den Einsatz in Katastrophengebieten vorgesehen ist. Derartige Systeme kommen sowohl im Freien oder auch innerhalb von Gebäuden zum Einsatz.

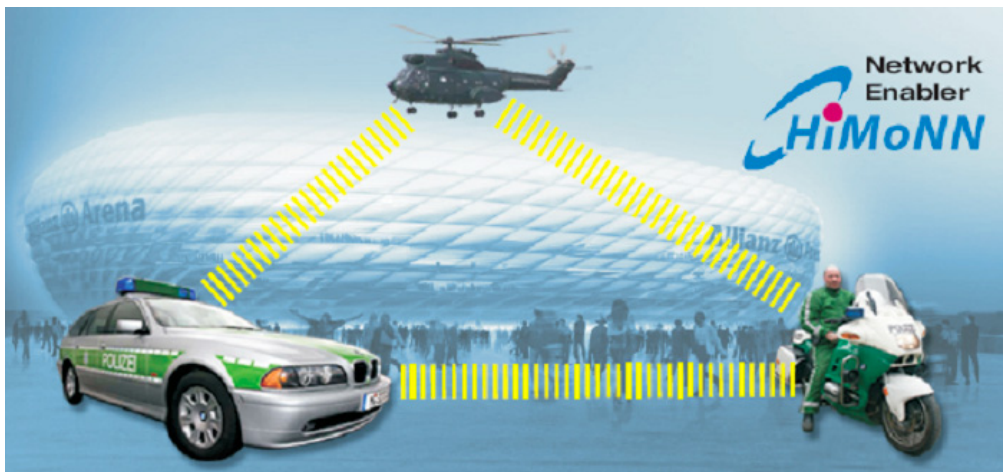


Abbildung 1.2: Produktbeispiel HiMoNN [27]

Die Umsetzung von Videoanwendungen in einem drahtlosen lokalen Netzwerk für Behördenanwendungen ist durchaus sinnvoll. So kann zum Beispiel ein Hubschrauber über eine Kamera Videoaufnahmen machen, die zu Einsatzkräften am Boden zur Unterstützung der Arbeit übertragen werden. Um die Aussagekraft der Videoaufnahmen abzusichern, ist eine hohe Robustheit bei der Videoübertragung gefordert, wobei durch ständige Bewegungen der Teilnehmer schwankende Übertragungsbedingungen angenommen werden müssen. Dies spricht für den Einsatz einer qualitätsskalierbaren Videocodierung in Verbindung mit einer geeigneten Übertragungsmethode.

Die steigende Bedeutung der Heimvernetzung für Kommunikation, Information und Unterhaltung ist ein wichtiger Treiber der angewandten Forschung in der Kommunikationstechnik. Ein Trend ist die Konvergenz aller Anwendungen auf



einheitlichen Dienst- und Vernetzungsplattformen [24] [25] [93]. Die Nutzung drahtloser lokaler Netzwerke bietet dabei eine ganze Reihe von Vorteilen. So lassen sich alle betreffenden Geräte in einem Haus oder einer Wohnung ohne zusätzlichen Verkabelungsaufwand in ein Netzwerk einbinden. Da insbesondere bei Häusern mit massiven Wänden und Betondecken mit einer hohen Dämpfung der drahtlosen Übertragung zu rechnen ist, ist der Einsatz einer drahtlosen multi-hop Ad-hoc Vernetzung sinnvoll, wie er beispielhaft in der Abbildung 1.3 dargestellt ist [46] [50]. An Multimedia-Anwendungen, insbesondere die Videoübertragung, werden im Heimbereich hohe Qualitätsanforderungen gestellt. Daher ist eine sehr gute Abstimmung der Videoebene auf die jeweilige Vernetzungssituation erforderlich.

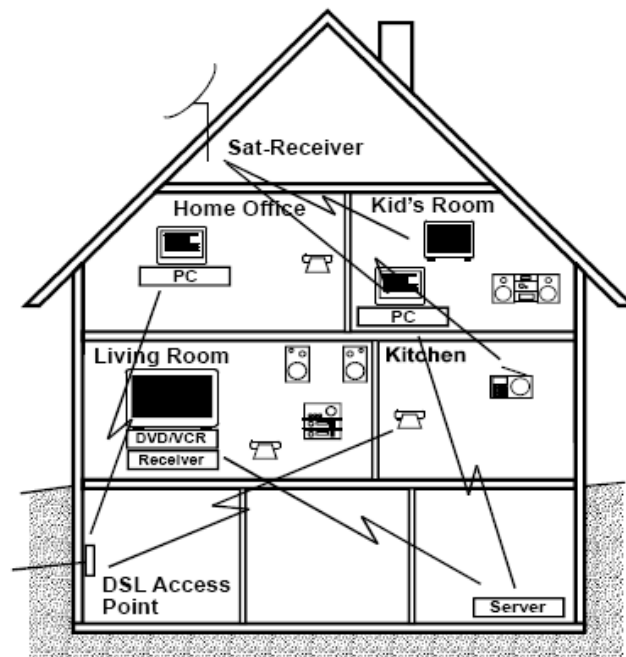


Abbildung 1.3: Drahtlose Vernetzung im Heimbereich nach [46]

Die beschriebenen Anwendungsszenarien zeigen das Potential für eine sinnvolle Integration von Videodiensten in drahtlose lokale Netze. Die Möglichkeiten für verschiedene Videoanwendungen sind dabei je nach Anwendungsszenario sehr vielfältig.

Eine für alle Szenarien gültige Anforderung ist die Robustheit der Videoanwendungen in einem möglichst hohen Einsatzbereich. Unter Robustheit einer Videoanwendung ist in dem Zusammenhang die Fähigkeit des Erhalts einer für den Nutzer ausreichenden Videoqualität bei sich ändernden Randbedingungen der Übertragung zu verstehen. Da bei der drahtlosen

Übertragung und Vernetzung durch unbekannte oder zeitlich schwankende Netzbedingungen vorliegen, müssen zur Erfüllung dieser Anforderung spezielle Verfahren in die Übertragungskette integriert werden. Wie in [92] gezeigt wird, stellt der Einsatz der skalierbaren Videocodierung hierfür einen vielversprechenden Ansatz dar. Es ist zu erwarten, dass sowohl im Szenario Behördenfunk als auch bei der Heimvernetzung durch eine qualitätsskalierbare Videocodierung eine Steigerung der Robustheit erreicht werden kann. Hierfür ist jedoch eine angepasste Unterstützung für die Übertragung der skalierbar codierten Videodaten in einem drahtlosen Netzwerk erforderlich. Bei der skalierbaren Videocodierung entstehen mehrere Layer-Bitströme, die für die Wiederherstellung des Videosignals eine unterschiedliche Bedeutung besitzen. Ein geeignetes Verfahren für die Übertragung muss in der Lage sein, durch entsprechende Priorisierung diese Eigenschaft zu berücksichtigen. Besondere Bedeutung besitzt dabei der Fehlerschutz auf der Ebene der drahtlosen Übertragung. Dieser muss gewährleisten, dass in einem möglichst großen räumlichen Anwendungsbereich eine robuste Videoübertragung ermöglicht wird. Hierbei spielt insbesondere die fehlerfreie Übertragung des Base Layers eine grundlegende Rolle, da von ihm alle weiteren Layer hierarchisch abhängen. Wenn es gelingt, die Robustheit des Base Layers in einem größeren Bereich der drahtlosen Übertragung abzusichern, kann damit der Anwendungsbereich der Videoanwendungen, wie sie in den Szenarien gezeigt werden, weiter vergrößert werden.

Aktueller Stand der Technik ist die Übertragung skalierbar codierter Videodaten mit Standardverfahren wie dem WLAN Standard IEEE 802.11e. Dabei erfolgt eine Priorisierung der verschiedenen Layer-Bitströme derart, dass diese verschiedenen Transportklassen bei der Übertragung zugeordnet werden. Hierbei ist auch bereits die Verwendung eines ARQ-Fehlerschutzverfahrens eingeschlossen. Bei diesem Verfahren erfolgt eine mehrfache Wiederholung fehlerhaft übertragener Pakete. Dadurch kann die Paketfehlerrate, welche ein Maß für die Robustheit auf der Ebene der Übertragung im Netz darstellt, gesenkt werden. Die Einstellung des ARQ-Verfahrens erfolgt durch die Vorgabe der maximal möglichen Übertragungswiederholungen, dem Retry Limit. In den heute bestehenden Standards wird hierfür eine statische Parametrierung vorgegeben. Daraus resultiert, dass bis zu einem gewissen Grade die Paketfehlerrate reduziert werden kann. Es stellt sich jedoch die Frage, inwieweit darüber hinaus eine weitere Reduktion der Paketfehlerrate erzielt werden kann, wenn eine adaptive Parametrierung des Retry Limits vorgenommen wird. Diese muss dann wirksam werden, wenn die Qualität der physikalischen Übertragung abnimmt, zum Beispiel bei steigender Distanz zwischen den Endgeräten. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Einsatz des ARQ-Fehlerschutzes

die Übertragungskapazität beeinflusst, da für die Übertragungs-wiederholungen ein Teil der Datenrate benötigt wird, der für Nutzdaten dann nicht mehr zur Verfügung steht. Dass kann letztendlich auch dazu führen, dass Überlastsituationen entstehen in denen Datenpakete verworfen werden müssen, was sich wiederum negativ auf die Robustheit der Übertragung auswirkt.

Für die Umsetzung einer adaptiven Parametrierung des Fehlerschutzes ist es daher zunächst erforderlich, geeignete Modellierungsansätze herauszuarbeiten, die die erforderlichen Kenngrößen und deren Zusammenhänge und Wechselwirkungen in geeigneter Weise abbilden. Es ist dabei auch notwendig nachzuweisen, dass die ausgewählten Modellansätze das reale Verhalten der Übertragung in geeigneter Weise widerspiegeln. Darauf aufbauend ist dann ein geeigneter Einstellalgorithmus für die adaptive Parametrierung des Fehlerschutzes zu entwerfen und zu verifizieren.

### **1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit**

Ausgehend von den einleitenden Fragenstellungen und dem daraus abgeleiteten Handlungsbedarf ergibt sich das Ziel dieser Arbeit in dem Entwurf und der Verifikation eines selbstoptimierenden adaptiven Einstellverfahrens für den ARQ-Fehlerschutz zur Steigerung der Robustheit bei der Übertragung skalierbar codierter Videodaten in drahtlosen lokalen Netzen. Für die Beschreibung und Diskussion des neuen Verfahrens muss dabei eine Modellbildung zu Grunde gelegt werden. Durch Einsatz dieses Verfahrens wird vor allem eine Erhöhung der Robustheit des Base Layers der skalierbar codierten Videodaten und damit eine Vergrößerung des Anwendungsbereiches der darauf aufbauenden Videoanwendung angestrebt. Zur Erreichung dieser Zielsetzung ist es erforderlich, eine geeignete Referenzarchitektur für die Übertragung zu spezifizieren, in die das neue Verfahren eingebettet werden kann. Es ist darüber hinaus das Ziel, das Verfahren so zu konzipieren, dass es mit bestehenden Standards der drahtlosen lokalen Übertragung zusammenarbeiten kann, um eine anwendungsnahe Umsetzbarkeit des Verfahrens zu gewährleisten.

Zur Bearbeitung der Thematik wird eine Vorgehensweise mit mehreren aufeinander aufbauenden Arbeitsschritten gewählt. Im ersten Schritt erfolgt die detaillierte Aufarbeitung des Themengebietes der Übertragung skalierbar codierter Videodaten in drahtlosen lokalen Netzen. Dies schließt neben der Aufarbeitung einiger wichtiger Grundlagen zum Verständnis der Thematik auch eine Anforderungsanalyse und die Bewertung des Standes der Wissenschaft und Technik ein. Ausgehend von den

Ergebnissen wird in einem folgenden Schritt eine Referenzarchitektur für die Übertragung skalierbar codierter Videodaten in drahtlosen lokalen Netzen spezifiziert, in die sich ein ARQ-Fehlerschutzprotokoll mit selbstoptimierender Parametrierung integrieren lässt. Dabei wird auf Realisierbarkeit mit bestehenden Standards drahtloser lokaler Netze Wert gelegt. Die Referenzarchitektur für die Übertragung wird in einer Simulationsumgebung implementiert auf deren Basis zunächst grundlegende Analysen und eine spätere Leistungsbewertung des neuen Verfahrens durchgeführt werden können. Den Kern der Arbeit bildet der Entwurf eines neuen Einstellverfahrens für das Retry-Limit des ARQ-Fehlerschutzprotokolls. Dieses Verfahren ist auf der Ebene des Medienzugriffes im drahtlosen Netzwerk angesiedelt und erlaubt eine Verbesserung der Robustheit der Übertragung skalierbar codierter Videodaten. Das neue Verfahren wird im Rahmen einer simulativen Leistungsbewertung einer Reihe verschiedener Testreihen unterzogen und verifiziert.

Aufbauend auf der beschriebenen Vorgehensweise leitet sich folgende Struktur der Arbeit ab: Das Kapitel 2 dient einer umfassenden Darstellung des Themengebietes der Übertragung skalierbar codierter Videodaten in drahtlosen lokalen Netzen. Zunächst erfolgen eine Beschreibung notwendiger Grundlagen und eine Definition der im Rahmen der Arbeit verwendeten Begriffe. Dabei werden auch Anforderungen an die Übertragung skalierbar codierter Videodaten herausgearbeitet und Bewertungskriterien abgeleitet. Im nächsten Schritt erfolgt eine Klassifizierung, Darstellung und Bewertung von Verfahren zum aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik. Daraus und unter Berücksichtigung der betrachteten Anwendungsszenarien leitet sich als wesentliches Fazit die besondere Eignung einer klassenbasierten priorisierten Referenzarchitektur für die Übertragung ab. Deshalb wird der weitere Fokus der Arbeit auf diese Übertragung gelegt.

Das Kapitel 3 dient grundlegenden Analysen für eine adaptive Fehlerschutzeinstellung. Basis dafür bildet die Spezifikation einer Referenzarchitektur für die klassenbasierte priorisierte Übertragung. Dafür werden verschiedene Detailspekte spezifiziert. Insbesondere werden verschiedene Varianten des Scheduling diskutierte und bewertet. Weiterhin werden Referenzverfahren für einen adaptiven Fehlerschutz untersucht, gegenübergestellt und bewertet.

Im Kapitel 4 wird die Spezifikation für ein neues Verfahren zur adaptiven Einstellung des Fehlerschutzes beschrieben, das die Übertragungseigenschaften drahtloser lokaler Netze hinsichtlich der aufgestellten Kriterien verbessern kann und dabei selbstoptimierend und standardkonform arbeitet.

---

Für das neue Verfahren werden im Kapitel 5 die Ergebnisse einer durchgeführten Leistungsbewertung anhand der aufgestellten Qualitätskriterien beschrieben.

Das Kapitel 6 enthält eine abschließende Zusammenfassung der Arbeit und einen Ausblick.



## **2 Übertragung skalierbar codierter Videodaten in drahtlosen lokalen Netzen**

### **2.1 Einleitung**

Dieses Kapitel beinhaltet eine Aufarbeitung der Thematik der Übertragung skalierbar codierter Videodaten in drahtlosen lokalen Netzen. Im ersten Schritt werden die notwendigen Grundlagen aus den Bereichen der skalierbaren Videocodierung, der drahtlosen Vernetzung sowie der Videoübertragung beschrieben. Weiterhin werden grundlegende Annahmen getroffen und begründet sowie die im Rahmen der Arbeit durchgängig verwendete Begriffe definiert. Ausgehend von den in der Einleitung aufgezeigten Anwendungsszenarien werden im zweiten Schritt Anforderungen an die Übertragung skalierbar codierter Videodaten abgeleitet. Zur späteren Bewertung der Erfüllung dieser Anforderungen werden Bewertungskriterien definiert. Im dritten Schritt wird der vorliegende Stand der Forschung und Technik aufgezeigt, eingeordnet und bewertet. Auf Basis der Ergebnisse dieser Bewertung werden in einem Fazit Schlüsse für die weitere Bearbeitung der Thematik gezogen.

### **2.2 Grundlagen und Begriffe**

#### **2.2.1 Wichtige Begriffe**

Dieser Abschnitt definiert einige grundlegende Begriffe für das Verständnis der in der Arbeit beschriebenen Thematik. Sofern nicht anders angegeben, werden die Begriffe im Kontext der gesamten Arbeit einheitlich wie hier beschrieben verwendet. Ein ausführliches Glossar mit allen verwendeten Begriffen befindet sich im Anhang der Arbeit.

**Robustheit** ist im Allgemeinen die Eigenschaft eines Systems, seine Funktionalität auch bei Änderungen der Umgebungsbedingungen aufrecht zu erhalten. Bei Kommunikationssystemen beschreibt die Robustheit die Eigenschaft, auch beim Auftreten von Störungen, zum Beispiel physikalischen Störungen und Interferenzen bei der drahtlosen Übertragung, die Daten der Anwendungsebene fehlerfrei zu übertragen. Für Kommunikationsanwendungen ist die Robustheit bei der Übertragung eine grundlegend wichtige Eigenschaft, da ohne diese ein einwandfreies Funktionieren der Anwendungen nicht gegeben ist.

**Adaptivität** beschreibt die Anpassungsfähigkeit eines Systems. Adaptive Kommunikationssysteme sind in der Lage, ihre Parameter an die Umgebung, zum Beispiel physikalische Störungen oder das Vorhandensein weiterer Kommunikationsteilnehmer, selbständig anzupassen. Adaptivität ist ein sehr gut geeigneter Lösungsansatz zur Erhöhung der Robustheit von drahtlosen Kommunikationssystemen, da diese zeitvariante Eigenschaften haben, die eine dynamische Anpassung der Übertragungstechnik erfordern.

**Selbstoptimierung** ist die Eigenschaft eines Systems sich entsprechend vorgegebener Ziele zu verhalten. Diese Ziele definieren das vom Nutzer gewünschte Verhalten eines Systems. Ein selbstoptimierendes Kommunikationssystem passt seine Parametrierung adaptiv zur Erreichung einer Zielvorgabe an. Zielvorgaben an selbstoptimierende Kommunikationssysteme können dabei die Robustheit oder eine einzuhaltende maximale Übertragungsverzögerung sein. Eine selbstoptimierende Arbeitsweise ist durch eine wiederholte Abarbeitung der Schritte: Ist-Analyse, Abgleich der Zielvorgaben und Anpassung des Systemverhaltens gegeben.

**Skalierbarkeit** beschreibt die Fähigkeit, bei einer Funktionalität Ressourcenbedarf und Leistungsfähigkeit analog zueinander einzustellen. Im Kontext der Videoübertragung bedeutet dies, Bildeigenschaften und benötigte Datenmenge entsprechend zueinander anzupassen. Ein wichtiges Kriterium bei der Skalierbarkeit ist die Anzahl der Stufen, die bei der Einstellung möglich sind. Demnach kann zwischen fein- und grobskalierbar unterschieden werden.

### 2.2.2 Definition eines digitalen Videoübertragungssystems

In diesem Abschnitt wird ein Videoübertragungssystem vorgestellt und definiert, wie es im Rahmen der Arbeit durchgehend verwendet wird. Ausgegangen wird grundsätzlich von einer digitalen Videoübertragung und einer paketbasierten Übertragung der digitalen



Videodaten. Ein digitales Bildsignal entsteht durch Abtastung und Quantisierung eines analogen Bildsignals, das den Lichtintensitätsverlauf eines Bildes repräsentiert. Eine digitale Videosequenz setzt sich aus einer Aufeinanderfolge digital repräsentierter Einzel- oder Halbbilder zusammen [78] [94]. Zum aktuellen Stand der Technik basieren Videoanwendungen wie Fernsehen, Videoüberwachung und Videokommunikation oder fast ausschließlich auf der digitalen Videotechnik, weshalb ihr heute im Vergleich zur analogen Videotechnik eine sehr hohe Bedeutung zukommt. Eine weitere grundlegende Annahme ist die Verwendung einer paketbasierten Übertragung der digitalen Videodaten. Dabei werden die Daten für die Übertragung und Zwischenspeicherung in Blöcke aus einer definierten Anzahl von Bits zusammengefasst. Die Größe dieser so gebildeten Pakete kann dabei unterschiedlich sein [109]. Heutige Kommunikationsnetze wie das Internet und drahtlose lokale Netze wie WLAN verwenden diese paketbasierte Übertragung. Tendenziell sollen zukünftig alle möglichen multimedialen Dienste und Anwendungen durch die paketbasierte Übertragung in Netzen realisiert werden. Aus diesem Trend leitet sich die getroffene Annahme der paketbasierten Übertragung ab.

Ein komplettes digitales Übertragungssystem für die paketbasierte Videoübertragung, in das sich die vorliegende Arbeit einordnen lässt, ist in der Abbildung 2.1 dargestellt. Es wird in die Bereiche Videoebene und Netzebene unterteilt. In der Literatur sind je nach Betrachtungsweise vergleichbare Ansätze für Videoübertragungssysteme zu finden [108] [109] [124] [134].

Die **Videoebene** umfasst alle Funktionen zur direkten Realisierung der Videoanwendung. Bei der Einordnung in das ISO/OSI Modell sind dies die Schichten 5 bis 7. Zur Videoebene gehören die Verarbeitung des Signals der Videoquelle bzw. Videoanzeige, die Videocodierung und die Pufferung des Bitstromes. Für die Videocodierung (Encodierung, Decodierung) kommen Verfahren, wie sie im Abschnitt 2.2.3 beschrieben werden, zum Einsatz. Wenn es sich bei der Videocodierung um eine Offline-Videocodierung handelt, kommt beim Sender auch eine Speicherung hinzu. Dies ist für Streaming-Anwendungen von vorcodierten Inhalten erforderlich. Videoübertragungen über Netze erfolgen in der Regel in Echtzeit, das heißt es besteht ein fester zeitlicher Bezug zwischen dem Sender und dem Empfänger einer Videosequenz. Da jedoch sowohl im Netz als auch bei den Videodaten Schwankungen der Datenraten auftreten können, muss eine Pufferung auf der Videoebene berücksichtigt werden.

Die **Netzebene** umfasst alle Funktionen zur Paketverarbeitung und zur physikalischen Übertragung ohne direkten Bezug zur Videoanwendung. Im ISO/OSI Modell sind dies die Schichten 1 bis 4. Bei den Geräten werden neben Sender und Empfänger, die über beide

Ebenen verfügen, auf der Netzebene Netzelemente eingeführt, die auf den OSI Schichten 2 oder 3 verschiedene Kanäle oder Netzsegmente verbinden, z.B. Bridges, Router oder drahtlose Netzknoten. Bei einer drahtlosen lokalen Übertragung lassen sich auf der Netzebene Verfahren, wie im Abschnitt 2.2.4 vorgestellt werden, einordnen.

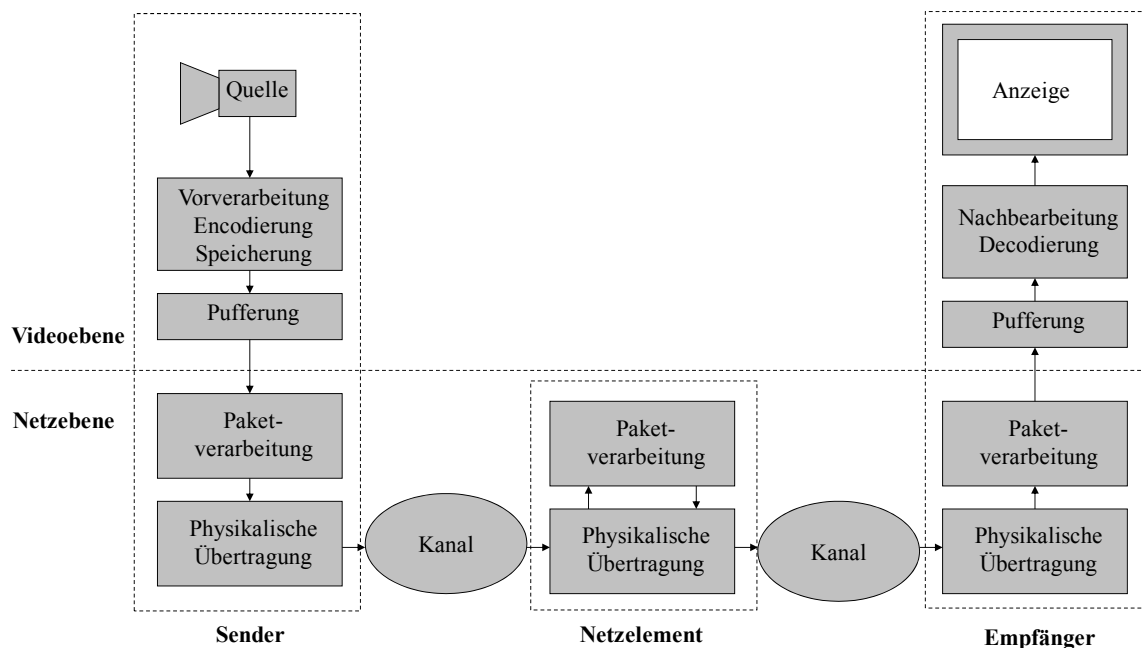


Abbildung 2.1: Digitales paketbasiertes Videoübertragungssystem

In den folgenden Abschnitten werden die Verfahren der digitalen Videocodierung und der Übertragung in drahtlosen lokalen Netzen ausführlicher beschrieben, da sie für den in der Arbeit vorgestellten Lösungsansatz von grundlegender Bedeutung sind.

## 2.2.3 Skalierbare Videocodierung

### 2.2.3.1 Verfahren und Standards der Videocodierung

Die digitale **Videocodierung**, auch Videokompression, ist eine spezielle Art der digitalen Quellencodierung [83] [119], bei der eine digitale Bildsequenz in einen Bitstrom hoher Informationsdichte überführt wird. Um eine möglichst hohe Codiereffizienz dabei zu erreichen, basieren die Methoden der Videocodierung auf Redundanz- und Irrelevanzreduktion. Für die digitale Videocodierung ist der Einsatz eines Videoencoders und eines Videodecoders erforderlich. Während der Videoencoder die Erzeugung des Bitstromes übernimmt, dient der Videodecoder zur Überführung des Bitstromes in eine

Abbildung der codierten digitalen Bildsequenz. Da bei der digitalen Videocodierung eine sehr hohe Codiereffizienz angestrebt wird, kommen in der Regel verlustbehaftete Codierverfahren zum Einsatz. Dadurch ist die decodierte Abbildung nicht identisch mit der Originalsequenz.

Eine digitale Übertragungskette für Videoinformationen ist in der Abbildung 2.2 dargestellt. Ausgangspunkt ist ein Quellsignal einer Videokamera das sich als Farbsignal aus einem Luminanz- und Chrominanzsignal zusammensetzt. Beispiel für ein solches Signal ist das Farb-, Bild-, Austast-, Synchronsignal (FBAS) [94]. Mit Hilfe einer Vorverarbeitung zu der auch eine Abtastung und Digitalisierung gehören, wird eine digitale Bildsequenz, bestehend aus einem zeitlichen Ablauf von Einzelbildern, erzeugt. Für digitale Bildsequenzen werden Standardformate verwendet, wie sie zum Beispiel durch das Common Intermediate Format (CIF) [78] [138] vorgegeben sind. Charakteristische Größen für digitale Bildsequenzen sind die räumliche Auflösung und die Bildwiederholrate. Der durch die Videocodierung erzeugte Bitstrom kann je nach Anwendungsfall gespeichert oder übertragen werden.

Zur Wiederherstellung der Videoinformation muss der Bitstrom einer Videodecodierung und gegebenenfalls einer Nachbereitung, zum Beispiel Digital-Analog-Wandlung, unterzogen werden. Für die Videocodierung wurden in den letzten Jahrzehnten verschiedene Codiermethoden, wie Entropiecodierung, Transformationscodierung und bewegungskompensierte Prädiktion eingesetzt. Eine detaillierte Übersicht einzelner Methoden kann [78] oder [125] entnommen werden.

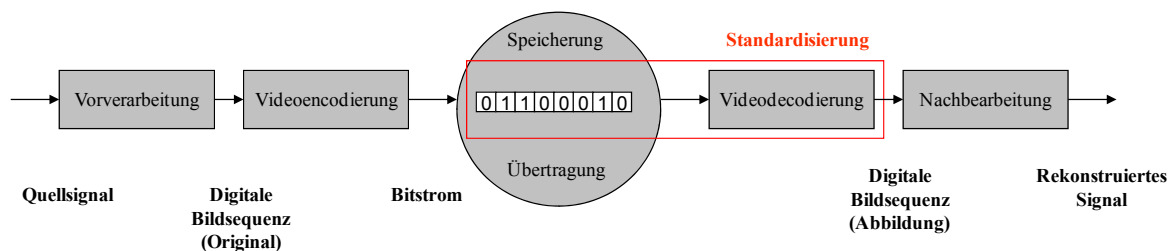


Abbildung 2.2: Digitale Übertragungskette für Videoinformationen mit Videocodierung

Für den Videoencoder hat sich zum Erzeugen standardkonformer Bitströme eine hybride Codierung durchgesetzt [78] [138]. Bei der hybriden Codierung werden einzelne zusammenpassende Codiermethoden kombiniert. In der Abbildung 2.3 ist die Struktur eines hybriden Encoders dargestellt, wie er in der Standardisierung nach ITU-T H.264 AVC vorgeschlagen wird [44] [125] [130]. Eine detaillierte Beschreibung der

Funktionsweise des Encoders sowie der eingesetzten Codiermethoden kann ebenfalls [125] [130] entnommen werden.

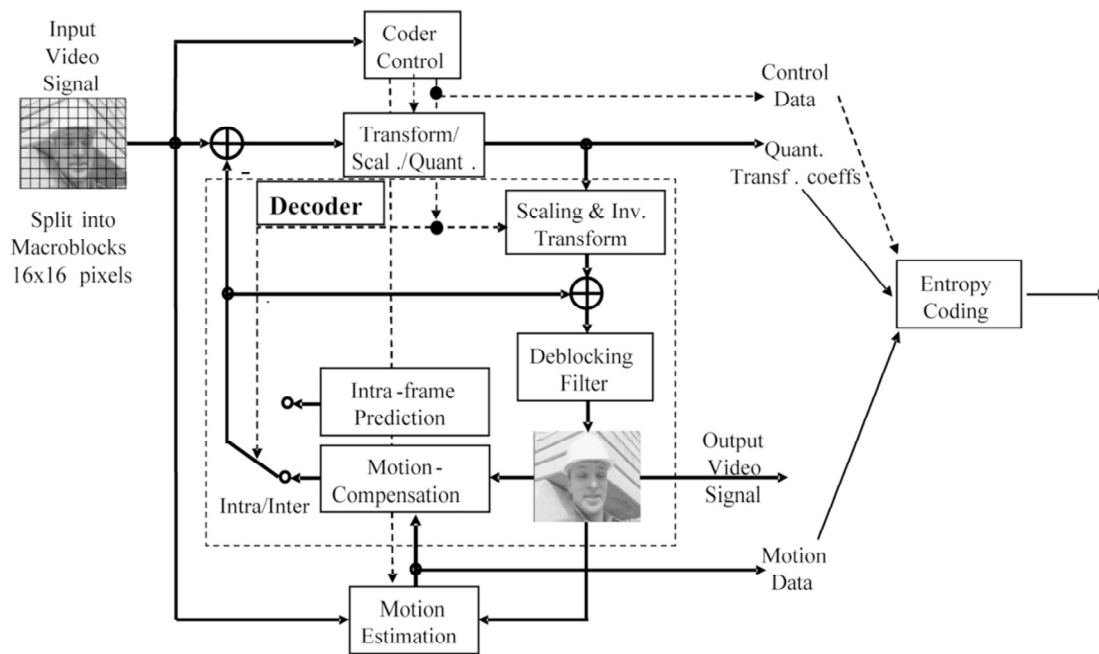


Abbildung 2.3: Hybride Encoderstruktur am Beispiel H.264/AVC [130]

Um einen einheitlichen Einsatz der Videocodierung in Produkten für Kommunikations- und Unterhaltungselektronik zu gewährleisten, wurden Videocodierstandards etabliert. Gegenstand der Standardisierung ist, wie in der Abbildung 2.2 ebenfalls dargestellt, eine einheitliche Spezifikation für den Bitstrom, der das codierte Videosignal repräsentiert, sowie einen Decoder zur Überführung des Bitstroms in eine digitale Bildsequenz. In der Vergangenheit wurden Codierstandards an einem speziellen Anwendungszweck ausgerichtet. Beispiele hierfür sind die Standards H.261 [41] und H.263 [11] [42] [43] für die Videotelefonie bzw. die Standards MPEG-1 [37] und MPEG-2 [38] für die Unterhaltungselektronik. Im Zuge der Konvergenz zwischen Kommunikation, Unterhaltung und Computerindustrie besteht heute das primäre Ziel in der Schaffung flexibler und universell einsetzbarer Codierstandards. Hierzu zählen die Standards MPEG-4 [40] sowie H.264 AVC [44]. Alle heute relevanten Videocodierstandards werden in der Tabelle 2-1 zusammengefasst. Ausführliche Beschreibungen der einzelnen Standardisierungsaktivitäten sind beispielsweise in [84] und [125] zu finden.

Standard	Standardisierungs-gremium	Primärer Einsatzzweck	Bitratenbereich
<b>MPEG-1</b>	ISO/IEC	Speicherung	1,5 Mbit/s
<b>MPEG-2</b>	ISO/IEC	Unterhaltung	2 – 20 Mbit/s
<b>MPEG-4</b>	ISO/IEC	Universell	5 kbit/s – n x 100 Mbit/s
<b>H.261</b>	ITU-T	Videotelefonie	n x 64 kbit/s (n=[1 ... 30])
<b>H.263</b>	ITU-T	Videotelefonie	10 – 2048 kbit/s
<b>H.264</b>	JVT von ISO und ITU-T	Universell	5 kbit/s – n x 100 Mbit/s

Tabelle 2-1: Videocodierstandards

In den vergangenen Jahren wurde durch das Joint Video Team als Kooperationsprojekt zwischen ITU-T und ISO/IEC die Standardisierungsaktivität H.264 AVC bzw. ISO/IEC 14496-10 (MPEG-4 AVC) abgeschlossen und überarbeitet [44]. Durch zahlreiche Optimierungsvorschläge für die Encoderstruktur weist der Standard eine sichtbar höhere Codiereffizienz als seine Vorgänger auf [130]. Zum Erreichen einer möglichst hohen Flexibilität für verschiedenste Anwendungsbereiche wurde eine offene Architektur bestehend aus einem Videocodinglayer (VCL) und einem Network Abstraction Layer (NAL) gewählt. Während der VCL eine hocheffiziente Videocodierung beinhaltet, sichert der NAL die Adaption des Bitstromes für verschiedene Anwendungen bzw. Netzübertragungen ab (Siehe Abbildung 2.4).

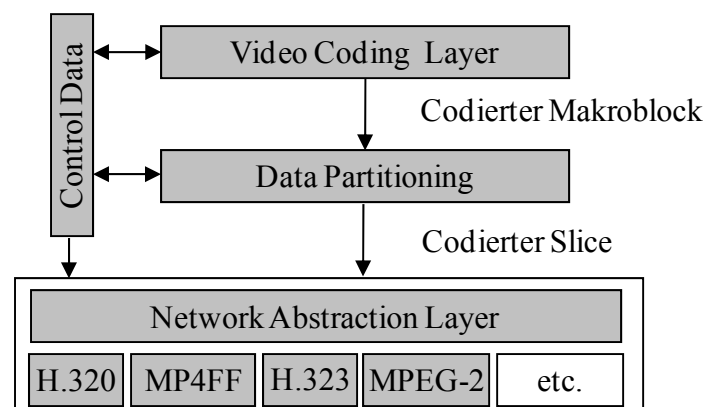


Abbildung 2.4: Struktur des Encoders nach H.264 AVC

Für die robuste Übertragung eines Bitstromes spielen zwei Problemstellungen eine wichtige Rolle: die Auswirkung und Behandlung von Übertragungsfehlern sowie die Abstimmung der Datenraten zwischen der Netz- und der Videoebene. Diese Aspekte müssen durch spezielle Verfahren bei der digitalen Videoübertragung behandelt werden:

- **Fehlerschutz und Fehlerbehandlung:** Durch ihre hohe Informationsdichte sind die bei der prädiktiven Videocodierung generierten Bitströme besonders empfindlich gegenüber Übertragungsfehlern. Von daher ist es erforderlich, sowohl bei der Videocodierung als auch bei der Übertragung der Bitströme entsprechende Verfahren zur Vermeidung oder Behandlung von Übertragungsfehlern vorzusehen. Verfahren für die Fehlerbehandlung können auf der Videoebene und auf der Netzebene eingesetzt werden. Die Arten sind dabei sehr verschieden. Auf der Videoebene kommen in erster Linie Verfahren zur Erhöhung der Robustheit des erzeugten Bitstromes oder zur Fehlerverschleierung zum Einsatz [109] [134]. Beispielsweise kann die Robustheit durch gezieltes Einfügen von Intra-Makroblöcken erfolgen [14] [108] [142]. Einen anderen Ansatz verfolgt die kombinierte Quellen- und Kanalcodierung. Hierbei wird die Videocodierung mit einer nachfolgenden Fehlerschutzcodierung verbunden und gemeinsam optimiert [16] [108]. Dieser Ansatz stellt die Grundlage für die Unequal Error Protection dar, die auch für skalierbare Videocodierung geeignet ist. Für spezielle Netze und Übertragungskanäle ist eine Reihe optimierter Verfahren bekannt, die eine Kombination oder Optimierung der grundlegenden Ansätze verfolgen. So gibt es eine ganze Reihe zugeschnittener Verfahren für die Behandlung von Paketfehlern bei der Videoübertragung im Internet [109] oder für die Übertragung in drahtlosen Netzen [14] [103] [104]. Allerdings unterstützen diese Verfahren nicht die Übertragung skalierbar codierten Videodaten.
- **Datenratenkontrolle und Puffermanagement:** Der zweite Aspekt ist die Abstimmung der Bitraten des Encoders mit Übertragungsparametern des Netzes um ein flüssiges Abspielen der Videosequenz am Empfänger zu gewährleisten. Hierfür ist es erforderlich, entsprechende Mechanismen und Verfahren zur Pufferung und zur Datenratenkontrolle in der Übertragungskette der digitalen Videoübertragung einzusetzen. Verfahren zur Datenratenkontrolle sind in erster Linie bei der Videocodierung und der Pufferung einzuordnen. Ziel der Datenratenkontrolle ist zum einen die Anpassung der Bitrate des Encoders an die Randbedingungen der Übertragung. Weiterhin muss durch die Datenratenkontrolle

gewährleistet werden, dass es nicht zu einem Über- oder Leerlaufen von Puffern in der Übertragungskette kommt. Das Einfügen von Puffern in die Übertragungskette ist erforderlich, da eine enge Synchronisierung zwischen der Videoanwendung und der paketbasierten Netzübertragung nicht möglich ist. Die Puffer ermöglichen einen Ausgleich zwischen schwankenden Übertragungseigenschaften im Netz und schwankenden Bitraten der Videoanwendung. Somit lässt sich ein flüssiges Abspielen der Videosequenz am Empfänger gewährleisten. Der Umfang der erlaubten Pufferung und die Art des eingesetzten Verfahrens für die Datenratenkontrolle sind stark von den Anforderungen der Videoanwendung abhängig. Die Datenratenkontrolle muss sicherstellen, dass weder ein Leerlauf noch ein Überlauf auftreten. Verfahren und Optimierungsansätze für die Datenratenkontrolle sind in der Literatur u.a. in [138] [139] [140] zu finden.

### 2.2.3.2 Spezielle Verfahren und Standards der skalierbaren Videocodierung

Eine wichtige Eigenschaft der im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Videocodierung besteht darin, dass ein codierter Bitstrom feste Vorgaben für Bildformat, Bildwiederholrate und Bildqualität enthält. Der Bitstrom muss dem Videodecoder vollständig und fehlerfrei zur Verfügung stehen, damit er diese festen Vorgaben entsprechend rekonstruieren kann. Die teilweise Auswertung und Decodierung des Bitstromes ist nicht vorgesehen. Im Gegensatz zu dieser nichtskalierbaren Codierung kann bei der **skalierbaren Videocodierung** eine Bildsequenz in verschiedenen Bildformaten, Bildwiederholraten oder Bildqualitäten in einen einheitlichen Bitstrom codiert werden [108] [125] [146]. Der Bitstrom enthält dabei verschiedene eingebettete Bitströme, die eine höhere Flexibilität bei der Decodierung erlauben (Abbildung 2.5). Je nach verfügbarer Bandbreite können einzelne eingebettete Bitströme für die Decodierung hinzugenommen oder weggelassen werden.

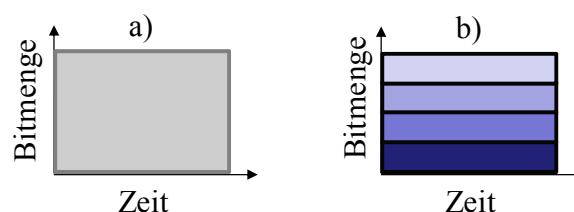


Abbildung 2.5: Vergleich (a) nichtskalierbare und (b) skalierbare Codierung

Bei der skalierbaren Videocodierung werden drei grundlegende Arten unterschieden: räumliche, zeitliche und qualitative Skalierbarkeit. Die räumlich skalierbare

Videocodierung erlaubt die Decodierung verschiedener räumlicher Auflösungen einer Bildsequenz aus einem einheitlichen Bitstrom. Codiermethoden, die eine räumliche Skalierbarkeit erlauben, basieren entweder auf der in den Videocodierstandards verwendeten prädiktiven Codierung oder auf alternativen Codiermethoden, wie dem Subband Coding [78] [118]. Bei der zeitlich skalierbaren Videocodierung wird die Decodierung verschiedener Bildwiederholraten einer Bildsequenz aus einem einheitlichen Bitstrom ermöglicht. Dies kann bei der prädiktiven Codierung durch Einfügen bidirektional prädizierter Frames (B-Frames) erreicht werden. Ähnlich wie bei der räumlichen Skalierung gibt es auch für die zeitliche Skalierung eine Reihe von Verfahren aus dem Bereich des Subband Codings, beispielsweise das Motion-compensated Subband Coding [10] [118]. Die qualitativ skalierbare, auch SNR skalierbare, Videocodierung erlaubt die Decodierung verschiedener Qualitätsstufen einer Bildsequenz aus einem Bitstrom. Verfahren, die für die Qualitätsskalierung eingesetzt werden, sind die schichtenweise Quantisierung von DCT-Koeffizienten (Layered Quantization of DCT values) [1] oder das Embedded Zerotree Wavelet Verfahren [100]. Eine zusätzliche Art der skalierbaren Videocodierung ist die Objektskalierbarkeit [146]. Hierbei besteht die Skalierung darin, bei der Decodierung einen bestimmten Anteil der in einer Bildsequenz dargestellten Objekte auszuwählen.

Die Codierung und Decodierung von skalierbaren Bitströmen erfordert in der Videocodierung neben den geeigneten Codiermethoden auch spezielle Codierschemata. In vielen Fällen wird das in der Standardisierung vorgeschlagene hybride Codierschema erweitert. Die gebräuchlichsten Codierschemata sind Layered Coding, Fine Granularity Scalability und Combined Scalability. Beim Layered Coding wird das codierte Videosignal durch einen Base Layer Bitstrom und einen oder mehrere Enhancement Layer Bitströme repräsentiert. Je nach Art der Skalierbarkeit dient der Base Layer Bitstrom zur Bereitstellung einer minimalen Qualität oder Auflösung. Die Enhancement Layer Bitströme sind hierarchisch von dem Base Layer Bitstrom abhängig. Sie ermöglichen eine stufenweise Erweiterung der Auflösung beziehungsweise Verbesserung der Qualität. Layered Coding ist daher sehr gut anwendbar zur Realisierung von räumlich und qualitativ skalierbarer Videocodierung. In der Abbildung 2.6 ist ein Encoderschema für die qualitative Skalierung dargestellt, wie es beispielsweise im Standard MPEG-2 verwendet wird.



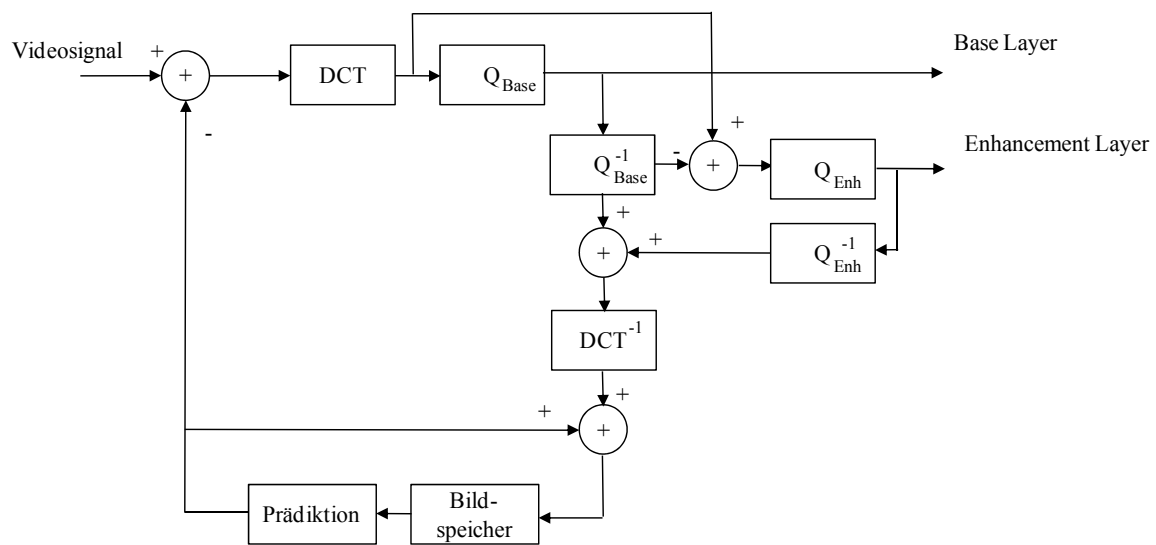


Abbildung 2.6: Layered Coding für qualitative Skalierung

Für die qualitativ skalierbare Videocodierung besteht beim Layered Coding der Nachteil, dass nur eine begrenzte Anzahl an Layern und damit Qualitätsstufen mit vertretbarem Aufwand erzeugt werden kann. Dieser Nachteil wird durch die Einführung der Fine Granularity Scalability (FGS) behoben. Dabei wird das Videosignal ebenfalls in einen Base Layer Bitstrom und einen oder mehrere Enhancement Layer Bitströme codiert. Im Vergleich zum Layered Coding lassen sich bei FGS die Layer in beliebig skalierbarer Anzahl und mit variabler Datenrate erzeugen. Eines der ersten Verfahren für die FGS-Videocodierung wurde durch Li vorgestellt [63]. Es basiert auf einer Bitplane Codierung der Enhancement Layer. Bei einer Nutzung von 8-bit Bitplanes lassen sich so bis zu acht verschiedene Enhancement Layer Bitströme erzeugen. Wie in [63] und [115] vorgeschlagen, lässt sich FGS auch sehr gut mit zeitlicher Skalierbarkeit kombinieren. Wesentlicher Nachteil des Verfahrens ist seine mangelnde Codiereffizienz. Neuere FGS-Codierschemata wie Progressive Refinement [97] können diesen Nachteil kompensieren. Werden räumliche, zeitliche und qualitative Skalierbarkeit in einem Codierschema kombiniert, spricht man von Combined Scalability.

Eine andere Art Codierung einer digitalen Videosequenz in verschiedene Bitströme ist das Multiple Description Coding (MDC) [20]. Wie beim Layered Coding werden hier aus einem Videosignal mehrere Bitströme (Descriptions) codiert, jedoch existiert bei MDC keine hierarchische Abhängigkeit der Bitströme untereinander. Diese Eigenschaft lässt sich für die Übertragung sehr gut mit Multipfad-Routing Verfahren nutzen. Codierschemata für die Videocodierung, die auf MDC basieren werden zum Beispiel in [77] oder [87] beschrieben. Untersuchungen zum Vergleich von Layered Coding und MDC haben gezeigt,

dass MDC für die Steigerung der Robustheit nur unter bestimmten Umständen Verbesserungen bringen kann [7]. Da jedoch MDC keine feingranulare Qualitätsskalierung wie FGS erlaubt, sind MDC-basierte Verfahren zur Erreichung der Zielsetzung der Arbeit nicht geeignet und werden nicht weiter verfolgt.

In der Standardisierung wird die skalierbare Videocodierung als Erweiterung in vielen gängigen Videocodierstandards spezifiziert. Layered Coding auf Basis von einem Base Layer und einem Enhancement Layer wurde erstmals für MPEG-2 [2] [38] und H.263 (Annex O) [42] in die Standardisierung aufgenommen. In der neueren Version H.263++ [43] werden auch mehrere Layer unterstützt. Das Konzept der Fine Granularity Scalability wurde erstmals in der Standardisierung von MPEG-4 [40] [63] eingeführt. Da die bis dahin eingesetzten Verfahren einen erheblichen Verlust der Codiereffizienz mit sich brachten, hat sich die skalierbare Videocodierung kommerziell nicht durchsetzen können. Im Rahmen der Standardisierung bei der ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 11 (MPEG) wurde aus diesem Grund 2001 die Suche nach neuen effizienteren Verfahren für die skalierbare Videocodierung aufgenommen. Im Rahmen eines folgenden Call for Proposals setzte sich eine Erweiterung des bis dahin in der Standardisierung befindlichen H.264/MPEG4-AVC [44] gegenüber anderen meist auf Waveletcodierung basierenden Verfahren durch [131]. Daraufhin beschlossen MPEG und die ITU-T SG16 Q.6 (VCEG) das Projekt Scalable Video Coding (SVC) auf dieser Basis im Rahmen einer gemeinsamen Standardisierungsgruppe, dem Joint Video Team, durchzuführen. Im Verlauf der Erstellung der vorliegenden Arbeit befindet sich SVC in der Standardisierung, wobei zwischenzeitlich im Jahr 2007 SVC als Annex G in den ITU-T Standard H.264 aufgenommen wurde und in der aktuellen Version 5.0 des Standards dort vorliegt [44]. Soweit nicht anders gekennzeichnet bezieht sich die Arbeit auf diese Version des Standards sowie auf den verwendeten Zwischenstand in [88] und den Referenzcodec in [89]. Die folgende einführende Beschreibung zu SVC wurde unter anderem [92] [97] und [131] entnommen. In SVC wird das Konzept der Combined Scalability umgesetzt. Räumliche, zeitliche und qualitative Skalierung werden in einem Codierschema realisiert. Einen Überblick über eine mögliche Auslegung des gesamten Codierschemas gibt die Abbildung 2.7. Wesentlicher Basisblock für SVC ist der nichtskalierbare Videoencoder nach H.264/MPEG4-AVC. Das hat den Vorteil, dass der von SVC erzeugte Base Layer Bitstrom auch von einem AVC Decoder decodiert werden kann. Speziell für die räumlich und die qualitative Skalierung wurden in SVC neue Verfahren eingeführt.

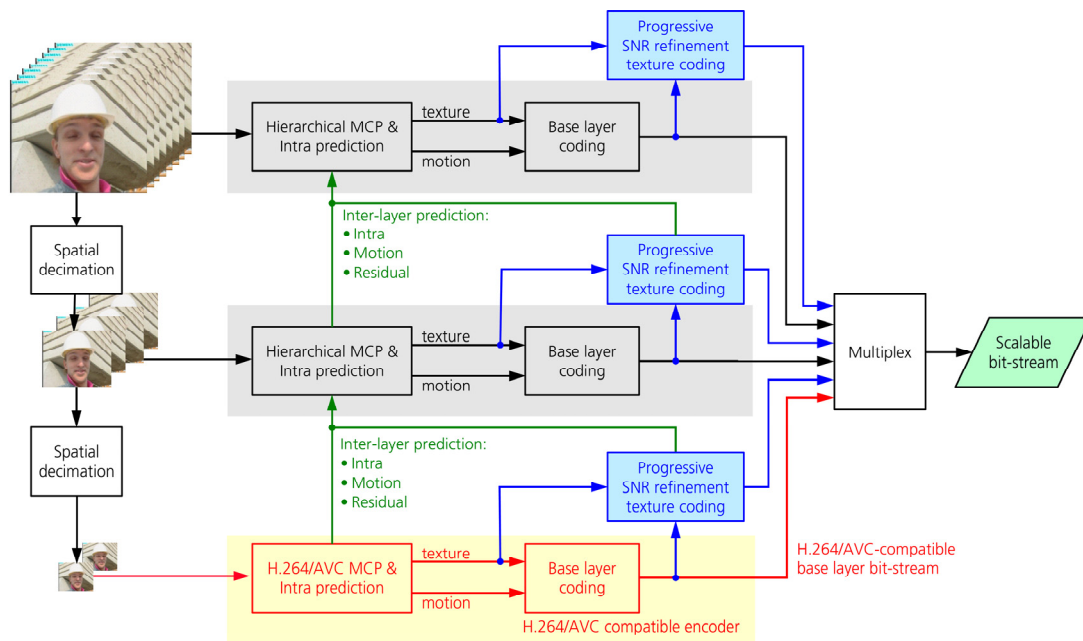


Abbildung 2.7: Struktur des Encoders nach H.264 SVC [132]

Innerhalb jedes örtlichen und grob abgestuften SNR Layers werden die bewegungskompensierte Prädiktion und die Intra-Prädiktion wie in H.264/MPEG4-AVC verwendet. Zusätzlich wird eine Inter-Layer Prädiktion eingeführt, die die Redundanz zwischen den Layern ausnutzt. Dabei werden Bewegungs- und Texturinformationen verwendet. Zur Qualitätsskalierung sind in SVC zwei unterschiedliche Ansätze vorgesehen. Bei der Layered SNR Scalability werden verschiedene grobe Qualitätsstufen der Layer ermöglicht. Darüber hinaus ist eine feinstufige Qualitätsskalierung (FGS) auf Basis von Progressive Refinement realisierbar [132]. Hierbei wird zur Erzeugung jedes weiteren Enhancement Layers das Signal des Codierfehlers mit einer verfeinerten Quantisiererstufe codiert. Dabei wird die Quantisiererstufe in etwa halbiert, was einem Quantisierungsparameter  $QP=6$  entspricht. Gleichzeitig wird eine Signaldarstellung verwendet, die im Decoder eine Rücktransformation aller Koeffizienten in einem Schritt ermöglicht.

Zur Einbettung der schrittweisen Verfeinerungen in den Bitstrom wurden spezielle Progressive Refinement Slices eingeführt. Hierbei werden zunächst die grob quantisierten Koeffizienten für alle Bildblöcke (Base Layer) übertragen. Die zugehörigen Verfeinerungen werden nach abnehmender Bedeutung für die Bildqualität umsortiert und angefügt (Siehe Abbildung 2.8 [131]).

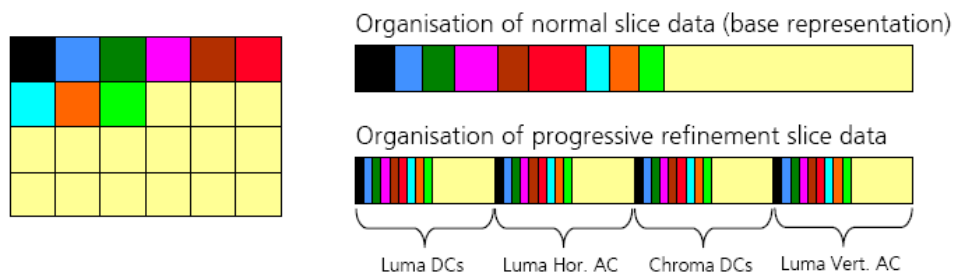


Abbildung 2.8: Anordnung der FGS Daten im SVC Bitstrom [132]

### 2.2.3.3 Eigenschaften skalierbar codierter Videodaten

Um Erkenntnisse für die spätere Aufstellung von Übertragungsanforderungen zu gewinnen, wurden die Eigenschaften der skalierbaren Videocodierung untersucht. Am Beispiel einer qualitätsskalierbaren Codierung mit H.264 SVC wurden die Skalierung der Videoqualität und die resultierenden Datenraten erfasst. Die erreichten Ergebnisse für die Testsequenz Forman sind in der Abbildung 2.9 dargestellt.

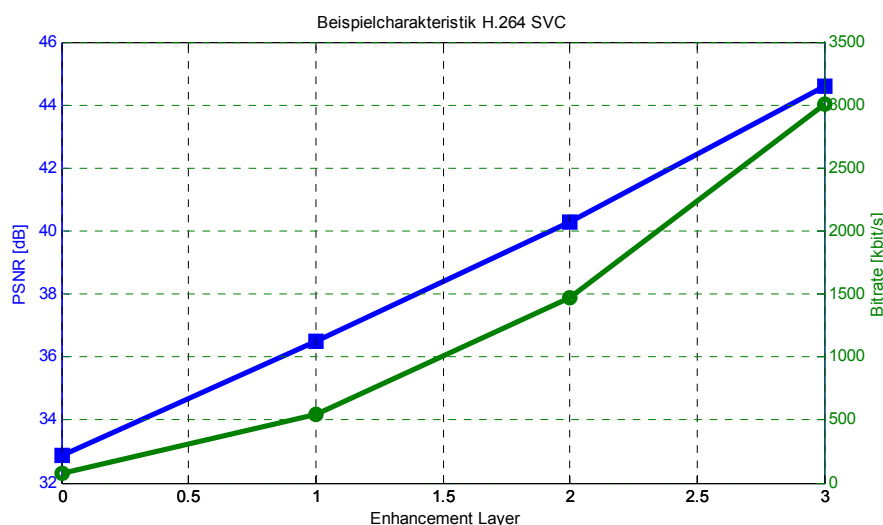


Abbildung 2.9: Skalierung von Videoqualität und Datenrate

Die Sequenz wurde mit einer steigenden Anzahl an Enhancement Layern codiert. Für jede Anzahl wurden die im Durchschnitt erhaltende Videoqualität und die Datenrate erfasst. Die Einstellung des FGS-Encoders des H.264 SVC ist so abgestimmt, dass sich bei der in PSNR gemessenen Videoqualität ein linearer Anstieg in Abhängigkeit der verwendeten Enhancement Layer ergibt. Gleichfalls steigt jedoch die produzierte Gesamtdatenrate aller

Bitströme nichtlinear zwischen 27 kbit/s und 3 Mbit/s. Es ergibt sich bei dieser Einstellung ein heterogener Lastvektor der einzelnen Bitströme für den Transport im Netz, da mit jeder Hinzunahme eines Enhancement Layers eine markante Steigerung der Datenrate zu verzeichnen ist. An dem Verhalten zeigt sich ein wesentlicher Vorteil der qualitätsskalierbaren Videocodierung. Je nach Verfügbarkeit der Enhancement Layer bei der Decodierung kann die Qualität linear skaliert werden. Bei einer nichtskalierbaren wäre jeweils nur ein Punkt in der Funktion in Abbildung 2.9 codierbar, wobei immer der volle Bitstrom für die Decodierung verfügbar sein muss.

#### 2.2.3.4 Bewertung und Fazit

Ein wesentlicher Vorteil der skalierbaren Videocodierung gegenüber der nichtskalierbaren Videocodierung liegt in der gewonnen Flexibilität bei der Verwendung des erzeugten Bitstroms. Dies lässt sich auf verschiedene Weise in Videoanwendungen nutzen:

- **Robuste Videoübertragung:** Speziell die qualitative Skalierung bietet Vorteile, um Videoanwendungen in Netzen mit Schwankungen der Übertragungsqualität robust zu realisieren. Als Basisqualität wird dabei die des Base Layers definiert. Die Enhancement Layer können entsprechend dem Qualitätszustand des Netzes übertragen werden.
- **Einmalige Codierung für verschiedene Netze und Empfänger:** Dies bietet vor allem Vorteile bei der Realisierung von Streaming Anwendungen, bei denen ein Videoinhalt nur einmal codiert wird und dann für verschiedene Endgeräte zur Verfügung gestellt wird. Durch die Skalierbarkeit des Bitstroms wird der Aufwand erheblich reduziert, da alle potentiellen Empfänger durch einen einheitlichen Bitstrom bedient werden können.

Wesentlicher Nachteil der skalierbaren Videocodierung war in der Vergangenheit die mangelnde Codiereffizienz. Durch die im neuen Standard H.264 SVC zum Einsatz kommenden Konzepte konnte dieser Nachteil gegenüber der nichtskalierbaren Videocodierung weitestgehend beseitigt werden.

### 2.2.4 Drahtlose lokale Vernetzung

#### 2.2.4.1 Einordnung und Begriffsdefinitionen

Die **drahtlose Kommunikation** basiert auf der physikalischen Übertragung von Informationen mittels elektromagnetischer Wellen (Radiowellen, Mikrowellen, Infrarot). Neben der Satellitenkommunikation zählt dazu vor allem die terrestrische drahtlose

Kommunikation. Bei der drahtlosen Vernetzung bilden **Netzwerkknoten** innerhalb einer bestimmten Reichweite ein drahtloses Netzwerk oder Funknetzwerk. Anhand der Reichweite können verschiedene Kategorien von drahtlosen Netzwerken unterschieden werden. Grundlegend lassen sich nach [86] drei große Gruppen drahtloser Netzwerke einteilen, die wie folgt definiert werden:

- **Wireless Wide Area Networks (WWAN)** erstrecken sich über große Entfernungen, beispielsweise über Städte oder ländliche Gebiete. Die bekanntesten Lösungen sind die Mobilfunknetze nach GSM mit GPRS sowie UMTS. Auch Technologien für die drahtlose Vernetzung in Stadtgebieten, beispielsweise Wimax sind hier einzuordnen.
- **Wireless Local Area Networks (WLAN)** haben eher lokalen Charakter, das heißt ihre Ausdehnung ist in der Regel auf ein Gebäude oder einen räumlich begrenzten Bereich außerhalb von Gebäuden beschränkt. Bedeutendste Vertreter sind heute die Netze nach dem Standard IEEE 802.11.
- **Wireless Personal Area Networks (WPAN)** dienen der Datenübertragung über kurze Distanzen, beispielsweise im direkten Umfeld des Menschen oder in der Peripherie eines Personalcomputers. Die Ausbreitung liegt hier bei maximal 10 m. Hierzu zählen Technologien wie Bluetooth, IrDA oder ZigBee.

Zu den **drahtlosen lokalen Netzen** können WLAN und WPAN zugeordnet werden. Es existieren verschiedene weitere Möglichkeiten, drahtlose lokale Netze zu definieren und zu klassifizieren. Hinsichtlich der Netztopologie lassen sich drahtlose lokale Netze in **Infrastruktur-Netze** und **infrastrukturlose Netze** einteilen. In Infrastruktur-Netzen wird für die Übertragung ein priorisierter Netzwerkknoten benötigt, über den die Kommunikation läuft und der zusätzliche koordinative Aufgaben im Netz übernimmt. Ein Beispiel hierfür ist der Access Point im WLAN. Bei der infrastrukturlosen Vernetzung können Netzwerkknoten in einem Netz direkt miteinander kommunizieren, müssen sich dabei aber untereinander organisieren. Da die räumliche Ausbreitung der drahtlosen Übertragung begrenzt ist, kann diese Kommunikation auch über mehrere Netzwerkknoten (Hops) hinweg erfolgen. Demnach muss eine drahtlose **single-hop** oder **multi-hop** Vernetzung unterschieden werden. Bei der multi-hop Vernetzung können zwei verschiedene Arten unterschieden werden: **mobile drahtlose Ad-hoc Netze** (MANET) oder **Wireless Meshed Networks** (WMN) [4]. Während drahtlose Ad-hoc Netze ohne Einbeziehung zusätzlicher Infrastrukturkomponenten auskommen, wird bei Wireless

Meshed Networks das Vorhandensein dieser Komponenten vorausgesetzt. Die Infrastrukturkomponenten in einem Wireless Meshed Networks können wiederum über drahtlose Backboneverbindungen untereinander vernetzt sein. Weitere Klassifizierungsansätze ergeben sich aus den physikalischen Kanaleigenschaften sowie der Anzahl und Mobilität der Knoten. Demnach können folgende Unterscheidungen getroffen werden:

- **Kanaleigenschaften:** Nach den Eigenschaften des Übertragungskanals kann eine Einteilung in Indoor- und Outdoor Szenarien erfolgen, da drahtlose Kanäle in beiden abweichende Eigenschaften besitzen. Während bei Outdoor-Kanälen in erster Linie atmosphärische Randbedingungen die Kanaleigenschaften beeinflussen, spielen bei Indoor Kanälen zusätzlich Effekte wie Wand- und Deckendämpfungen oder Reflexionen eine Rolle. Prinzipiell gelten für beide Kanalarten die gleichen physikalischen Effekte Dämpfung, Beugung, Streuung und Reflexion. Allerdings ergibt sich bei Indoor-Kanälen eine höhere Variabilität der Parameter [85].
- **Anzahl der Knoten:** Je nach Anwendungsfall können Netze, gemessen an der Anzahl von Netzknoten, bestimmte Größen einnehmen. Da diese Anzahl beliebig sein kann, ist eine allgemeingültige Klassifikation nicht möglich. Für eine grobe Einordnung kann aber eine Größeneinteilung von kleiner oder sehr viel größer als 10 Knoten als Orientierung verwendet werden.
- **Mobilität der Knoten:** Ein wesentlicher Vorteil der drahtlosen Vernetzung ist für den Anwender die Möglichkeit der freien Bewegung mit dem Endgerät. Daher muss die Mobilität der Netzknoten bei der Klassifikation berücksichtigt werden. Ein wichtiger Parameter ist dabei die mögliche Geschwindigkeit der Knoten. Als Orientierung wird hier eine Einteilung in quasistatische Netze ( $v < 5 \frac{m}{s}$ ) und Netze mit hoher Mobilität ( $v \gg 5 \frac{m}{s}$ ) vorgenommen.

#### 2.2.4.2 Grundlegende physikalische Eigenschaften der drahtlosen Übertragung

Die Eigenschaften der drahtlosen Vernetzung werden vor allem durch den drahtlosen Übertragungskanal bestimmt, da hier der wesentlichste Unterschied zur drahtgebundenen Übertragung liegt. Hinzu kommen Eigenschaften, die sich aus der Mobilität der Netzteilnehmer sowie deren Sendeverhalten ergeben. Die Datenübertragung über drahtlose Kanäle basiert auf der elektromagnetischen Wellenausbreitung durch das Medium Luft. Diese Ausbreitung ist physikalischen Effekten unterworfen wie Dämpfung, Reflexionen, Beugung und Streuung. Durch Reflexionen kommt es zu einer Mehrwegeausbreitung der Wellen zwischen Sender und Empfänger [21] [83] [85]. Die phasenverschobene

Überlagerung dieser Wellen ist neben der Dämpfung ein wesentlicher Grund für den Schwund der Empfangsleistung am Empfänger, der Einfluss auf die Qualität der drahtlosen Übertragung hat. Die Auswirkungen der Dämpfung auf die Empfangsleistung lassen sich mit Hilfe von Ausbreitungsmodellen beschreiben. Diese dienen zur Berechnung der Reichweite und der Abdeckung eines Funksystems innerhalb eines räumlichen Gebietes. Zu unterscheiden sind physikalische und empirische Modelle, wobei auch Mischformen beider Arten möglich sind. Zur Modellierung eines kompletten Funkkanals sind neben der Dämpfung auch die Überlagerung der Wellen sowie externe Rauschquellen zu berücksichtigen.

#### 2.2.4.3 Eigenschaften drahtloser lokaler Netze hinsichtlich der Robustheit

Zur Übertragung digitaler Daten wurden unter Berücksichtigung der physikalischen Kanalmodelle Übertragungsverfahren spezifiziert, die sich für drahtlose Kanäle eignen [83] [85]. Ein wichtiger Parameter für die erreichbare Robustheit der physikalischen Übertragung mit einem digitalen Übertragungsverfahren ist die **Bitfehlerrate** (BER). Sie gibt das Verhältnis der fehlerhaft übertragenen Bits bezogen auf eine Gesamtmenge gesendeter Bits an. Bei der drahtlosen Übertragung liegt diese Bitfehlerrate höher als bei der drahtgebundenen Übertragung. Daher sind spezielle Fehlerschutzverfahren in den Übertragungssystemen erforderlich, um diese Übertragungsfehler zu behandeln. Erfolgt die Übertragung paketbasiert, wie es in den meisten heutigen Netzen der Fall ist, wird für die Beurteilung der Robustheit der Übertragung die **Paketfehlerrate** (PER) verwendet. Diese hängt direkt von der Bitfehlerrate ab<sup>1</sup>. Wird eine gleichverteilte Bitfehlerrate angesetzt lässt sich die Paketfehlerrate anhand der Formel 2-1 daraus ermitteln.

$$PER = 1 - (1 - BER)^{8L} \quad (2-1)$$

Dabei beschreibt L die Paketlänge in Byte. In der Abbildung 2.10 a) ist der statische Zusammenhang von Bitfehlerrate (logarithmisch) und Paketfehlerrate (linear) beispielhaft dargestellt, der auf der Basis einer Simulation einer drahtlosen Übertragung ermittelt wurde. Die in Formel 2-1 dargestellte Gesetzmäßigkeit konnte hierbei bestätigt werden. In

---

<sup>1</sup> Auf der Schicht 2 des ISO/OSI Modells werden für die Übertragung Rahmen verwendet, in denen die Pakete transportiert werden. Wenn nicht explizit anders angegeben wird in der Arbeit angenommen, dass keine Fragmentierung der Pakete benötigt wird, das heißt ein Paket wird in einem Rahmen transportiert.



der Abbildung zeigt sich, dass bei logarithmisch steigender Bitfehlerrate ein starker linearer Anstieg der Paketfehlerrate zu verzeichnen ist. Nimmt man eine robuste Übertragung bei  $PER < 10^{-1}$  an, wäre diese nur bei einer Bitfehlerrate  $BER < 10^{-4}$  erreichbar.

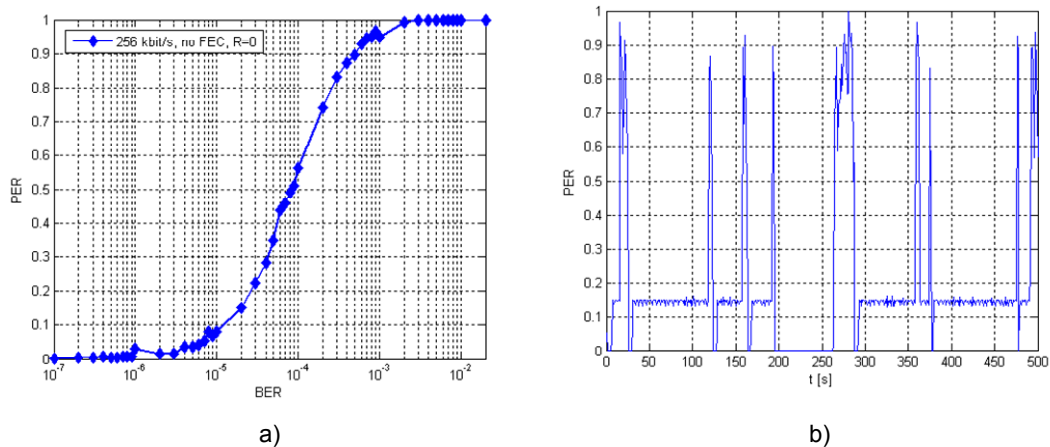


Abbildung 2.10: Paketfehlerrate (a: Bitfehlerabhängigkeit b: Routingeinflüsse)

Neben diesen grundlegenden Eigenschaften der physikalischen Schicht spielen weitere Effekte eine Rolle, die sich auf die Paketfehlerrate und damit die Übertragungsqualität auswirken. Wesentliche Effekte sind Kollisionen beim Medienzugriff und Verluste aufgrund von Routenänderungen. Da der drahtlose Übertragungskanal von allen Stationen in einem drahtlosen Netzwerk gemeinsam genutzt werden muss, sind spezielle Verfahren zur Kollisionsvermeidung, beispielsweise CSMA/CA, beim Senden erforderlich. Trotzdem können Kollisionen, das heißt gleichzeitige Sendeversuche zweier Stationen, nicht immer ausgeschlossen werden, was zusätzlich zu Übertragungsverlusten führt. Erfolgt die Übertragung in drahtlosen multi-hop Netzen, müssen geeignete Routingverfahren zum Einsatz kommen [45] [82]. Sind die Stationen dabei in Bewegung, müssen diese Routingverfahren dynamisch Änderungen der Routen im Netz vornehmen können. Die dynamische Änderung der Routen führt zu zusätzlichen, Verbindungsverlusten [23]. Diese treten für die Dauer der Routenänderung zeitlich begrenzt auf, haben aber einen starken Einfluss auf die resultierende Paketfehlerrate. Die Abbildung 2.10 b) zeigt Auswirkung der Routingverluste auf die resultierende Paketfehlerrate an einem Beispiel. In Summe sind die Paketfehlerrate und damit die Übertragungsqualität in einem drahtlosen Netz von verschiedenen sich überlagernden Faktoren abhängig.

#### 2.2.4.4 Verfahren zur Erhöhung der Robustheit bei der drahtlosen Übertragung

Wie in dem vorangegangenen Abschnitt gezeigt wurde, stellt die drahtlose Vernetzung hohe Anforderungen an die Erreichung robuster Übertragungsverbindungen. Es ist deshalb erforderlich, zusätzliche Fehlerschutzverfahren in eine Übertragungskette zu integrieren. Diese Verfahren können auf verschiedenen Schichten des ISO/OSI Schichtenmodells angewendet werden. Im Folgenden werden die drei grundlegenden Ansätze aufgezeigt und diskutiert. Ein wichtiges Verfahren ist die vorwärtsgerichtete Fehlerkorrekturcodierung oder Forward Error Correction (FEC) [66]. Dieses wird vorzugsweise auf der Schicht des Medienzugriffs (MAC) eingesetzt, um bei der Übertragung entstehende Bitfehler zu korrigieren. Für die Fehlerkorrektur kommen dabei spezielle Codes zum Einsatz. Eine wichtige Gruppe von Codierverfahren für die vorwärtsgerichtete Fehlerkorrekturcodierung sind die Reed-Solomon Codes. Diese gehören zu den Blockcodes, das heißt sie arbeiten auf Blöcken von Bits mit einer definierten Länge [66]. Ein Vorteil der vorwärtsgerichteten Fehlerkorrekturcodierung besteht darin, dass die Codierung im Sender und Empfänger unabhängig erfolgen kann. Es wird daher kein Rückkanal vom Empfänger zum Sender benötigt. Nachteile der Verfahren bestehen in der mangelnden Adaptivität, da die Codierung immer erfolgt, unabhängig vom Zustand des Übertragungsmediums, sowie in der Tatsache, dass für die Codierung zusätzliche Rechenleistung erforderlich ist. Allerdings ist die Adaptivität dieser Verfahren auch beim Einsatz eines Rückkanals eher gering.

Eine weitere Variante des Fehlerschutzes ist der Einsatz von Übertragungswiederholungen oder **Automatic Repeat Requests** (ARQ) [65]. Viele Verfahren für die drahtlose lokale Vernetzung, wie WLAN nach IEEE 802.11 oder Bluetooth, setzen für die Behandlung von Übertragungsfehlern (Bitfehlern) und Kollisionen das ARQ-Protokoll [65] [66] [95] auf der Schicht des Medienzugriffs ein. Dieses Protokoll liegt in drei verschiedenen Varianten vor: Stop-and-Wait (SW), Go-Back-N (GBN) und Selective Repeat (SR). Für den Einsatz als Fehlerschutzprotokoll in drahtlosen lokalen Netzen kommt vor allem die Variante Stop-and-Wait ARQ zum Einsatz [74][99]. Das Grundprinzip des SW-ARQ Protokolls nach [65] ist in der Abbildung 2.11 dargestellt. Jeder vom Sender übertragene Rahmen wird bei erfolgreichem Empfang mit einer positiven Bestätigung (ACK) oder beim Auftreten von Übertragungsfehlern durch eine negative Bestätigung (NAK) durch den Empfänger beantwortet. Die Entscheidung, ob ein Übertragungsfehler vorliegt wird durch einen Fehlererkennungscode ermittelt. Der Sender wartet mit dem Senden des nächsten Rahmens bis diese Bestätigung eintrifft. Bei einer negativen Bestätigung wird der Rahmen erneut gesendet. In der theoretischen Betrachtung ist die Anzahl der möglichen Sendeveruche

unendlich, jedoch muss sie bei der technischen Anwendung begrenzt werden. Aufgrund der Leerlaufzeit (Idle Time) des Kanals in der Wartezeit des Senders wurden die Verfahren GBN-ARQ und SR-ARQ entwickelt, die eine Durchsatz- und Effizienzsteigerung ermöglichen. Der Vorteil des ARQ-basierten Fehlerschutzes liegt in der Adaptivität, da Übertragungswiederholungen nur dann erfolgen, wenn Fehler aufgetreten sind. Ein weiterer Vorteil ist ein geringer Mehraufwand an Rechenleistung für die Protokollarbeit. Zudem lässt sich das ARQ-Verfahren gut mit den Mechanismen des Medienzugriffs kombinieren.

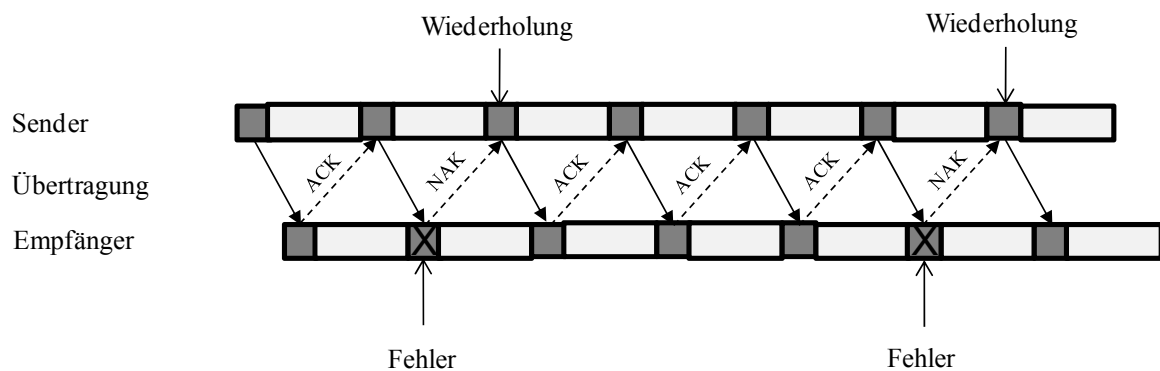


Abbildung 2.11: Grundprinzip Stop-and-Wait ARQ

Während die beiden vorangegangenen Verfahren in erster Linie auf der Schicht des Medienzugriffs eingesetzt werden, um Fehler bei der physikalischen Übertragung zu kompensieren, benötigen Netze mit hoher Mobilität der Knoten weitere Verfahren, um die in der Abbildung 2.10 b) dargestellten Paketfehler durch Routingeinflüsse zu kompensieren. Dies kann nur durch Verfahren auf der Routingebene, d.h. auf der Netzwerkschicht des ISO/OSI Schichtenmodells. Ein wichtiger Lösungsansatz sind hierfür vor allem Multipfad-Routingverfahren [45] [71]. Hierbei wird versucht, mehrere disjunkte Pfade in einem drahtlosen multi-hop Netzwerk aufzubauen, über die die Daten übertragen werden können. Somit kann bei Routenänderung immer auf Alternativpfade zurückgegriffen werden. Wichtigster Vertreter dieser Verfahren ist das Ad-hoc On-demand Multipath Distance Vector Routing (AOMDV) [71]. Der Einsatz derartiger Routingverfahren ist vor allem bei hoher Mobilität der einzelnen Netzknoten erforderlich. Für den effektiven Einsatz von Multipfad-Routing Verfahren ist auch eine große Anzahl an Netzknoten erforderlich, damit sich verschiedene disjunkte Pfade bilden lassen. In großen Netzen können diese Verfahren sehr gut zur Steigerung der Robustheit beitragen [45].

#### 2.2.4.5 Standardisierung der drahtlosen lokalen Vernetzung

Heute stehen für die drahtlose lokale Vernetzung verschiedene Übertragungsstandards zur Verfügung. Besonders bedeutend sind die Standards der IEEE in den Standardisierungsgruppen 802.11 für WLAN [28] [29] [30] [31] [32] und 802.15 für WPAN [33] [36]. Diese definieren einheitliche Verfahren für die physikalische Übertragungsschicht und die Sicherungsschicht des ISO/OSI Schichtenmodells. Darüber hinaus existieren Standards von Industriegremien, die diese grundlegenden Übertragungsstandards erweitern. Bekannteste Beispiele hierfür sind Bluetooth [5] und ZigBee [145]. Die wichtigsten Standards mit ihren Eigenschaften und typischen Anwendungen sind in der Tabelle 2-2 zusammengefasst.

	<b>802.11 WLAN</b>	<b>802.15.1 WPAN Bluetooth</b>	<b>802.15.4 WPAN ZigBee</b>
<b>Frequenzband</b>	2,4 GHz (11b/g/n) 5 GHz (11 a/n)	2,4 GHz 5 GHz	868/915 MHz 2,4 GHz
<b>Bruttodatenrate</b>	11 Mbit/s (11a/g) 54 Mbit/s (11b) 600 Mbit/s (11n)	1 Mbit/s 3 Mbit/s 54 Mbit/s	20/40 kbit/s 250 kbit/s
<b>Reichweite</b>	30 – 250 m	10 – 100 m	Bis 50 m
<b>Fehlerschutz</b>	ARQ, FEC	ARQ, FEC	ARQ
<b>Anwendungen</b>	Datennetze Multimedia	Headsets Peripheriegeräte	Sensornetze

Tabelle 2-2: Eigenschaften und Anwendungen drahtloser Vernetzungsstandards

Zur drahtlosen lokalen Vernetzung werden die sogenannten ISM-Bänder verwendet [86]. In diesen Bändern ist Betrieb von Geräten bis zu einer vorgegebenen maximalen Sendeleistung ohne gesonderte Genehmigung erlaubt. Die Regulierung der Bänder ist nicht international einheitlich. Beispielsweise ist in Deutschland für das 2,4 GHz Band eine

maximale Sendeleistung von 20 dBm (entspricht 100 mW) erlaubt. Je nach verwendetem Band und Sendeleistung sowie der Effizienz des eingesetzten Übertragungsverfahrens ergeben sich verschiedene Reichweiten. Die angegebenen Werte sind nur mittlere Richtwerte, da die jeweils im Einzelfall erreichbare Reichweite von vielen verschiedenen Faktoren abhängt. Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, kommen zur Erhöhung der Robustheit in den verschiedenen Standards Fehlerschutzverfahren zum Einsatz, wobei hier das ARQ-Protokoll als einziges Verfahren in allen Standards zu finden ist. Für die Realisierung von Multimedia-Anwendungen und damit auch für die Videoübertragung ist vor allem der WLAN-Standard nach IEEE 802.11 vorgesehen. Deshalb ist er für die weiteren Untersuchungen im Rahmen der Arbeit von besonderem Interesse. Seit der ersten Version des Standards [28] [29] wurde eine ganze Reihe von Erweiterungen spezifiziert. Hierzu zählen Übertragungsverfahren zum Erreichen höherer Datenraten [30] [31] [32], Verfahren für die Realisierung von Quality-of-Service [35] und Sicherheitsfunktionen [34]. Eine weiterführende Einführung und Beschreibung der einzelnen Standards kann [21] oder [121] entnommen werden.

#### **2.2.4.6 Bewertung und Fazit**

Die drahtlose lokale Vernetzung erlaubt eine flexible Datenübertragung zwischen mobilen Endgeräten innerhalb einer bestimmten Reichweite. Von den heute bekannten Standardverfahren ist vor allem das WLAN nach IEEE 802.11 für die Videoübertragung relevant. Aufgrund der physikalischen Eigenschaften der drahtlosen Übertragung und dem Verhalten der einzelnen Netzknoten ist mit dem Auftreten von Bitfehlern, Kollisionen und Routingverlusten zu rechnen. Deshalb ist es erforderlich, Fehlerschutzverfahren zur Erhöhung der Robustheit der Übertragung einzubeziehen, um eine ausreichende Qualität von Anwendungen zu gewährleisten. Bei den Fehlerschutzverfahren spielt vor allem das ARQ-Protokoll eine wichtige Rolle, da es insbesondere bei der drahtlosen lokalen Vernetzung einen breiten Einsatz findet.

#### **2.2.5 Zusammenfassung und Fazit**

Der vorliegende Abschnitt gibt einen Überblick über die grundlegenden Verfahren und Problemstellungen der Videocodierung und drahtlosen Vernetzung. Weiterhin werden Begriffsdefinitionen durchgeführt, die im weiteren Verlauf der Arbeit durchgängig verwendet werden. Die heute standardisiert vorliegenden Verfahren der skalierbaren Videocodierung bilden eine gute Basis für eine robuste Videoübertragung. Insbesondere die qualitätsskalierbare Videocodierung stellt einen passenden Ansatz zur Erhöhung der

Robustheit dar, da sie es erlaubt, die Qualität der Videoübertragung abhängig von der übertragbaren Datenmenge des Bitstromes einzustellen.

Die drahtlose lokale Vernetzung stellt eine wesentliche Basis für die Bildung einer allgegenwärtig vernetzten Umgebung des Menschen dar. Neben reinen Datendiensten müssen dabei auch Multimedia-Anwendungen, wie Videodienste, unterstützt werden. Der Funkkanal erfordert hierfür aufgrund seiner Eigenschaften jedoch spezifische Verfahren. Insbesondere wichtig ist die Behandlung von Übertragungsfehlern des Funkkanals und Übertragungsfehlern durch Routenänderungen aufgrund der Mobilität der Endgeräte. Diese Übertragungsfehler können die Anwendungsqualität maßgeblich beeinflussen. Aufgrund der verschiedenen Schwund-Effekte des drahtlosen Kanals können sich die Änderungen der Übertragungsqualität sehr schnell, das heißt im Zeitbereich weniger Millisekunden vollziehen. Dies erfordert Verfahren, die in der Lage sind, sich adaptiv an diese Änderungen anzupassen.

Zunächst ist eine Erfassung und Formulierung der Anforderungen an die robuste Übertragung von Videodaten erforderlich. Ebenfalls müssen Kriterien definiert werden, die es erlauben, die Erfüllung der gestellten Anforderungen durch neue Verfahren zu verifizieren.

## **2.3 Anforderungen bei der Übertragung skalierbar codierter Videodaten**

### **2.3.1 Allgemeine Anforderungen der digitalen Videoübertragung**

Die digitale Videoübertragung umfasst die Übertragung digital codierter Videodaten über einen physikalischen Kanal oder in einem Netzwerk. Hieraus lassen sich verschiedene Anwendungen ableiten, beispielsweise die Videokommunikation (auch Videokonferenz) und die kontinuierliche Übertragung von Videoinhalten von einem Server auf verschiedene Endgeräte (auch Videostreaming). Wie bereits im Abschnitt 2.2.3 beschrieben, liegen die zu übertragenden Daten jeweils in Form eines hochkomprimierten Bitstromes vor. Aus den Eigenschaften dieses Bitstromes und aus den Anforderungen der zu realisierenden Anwendung, ergeben sich eine Reihe von Anforderungen an die Übertragung [78] [109] [111] [112]:

- **Bandbreite:** Das Netz muss entsprechend der bei der Codierung entstehenden Datenraten (Siehe Tabelle 2-1) ausreichend Bandbreite zur Verfügung stellen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Datenraten entweder zeitlich konstant (Constant Bitrate) oder variabel (Variable Bitrate) sein können. Dementsprechend werden CBR und VBR Videoanwendungen unterschieden [109].
- **Übertragungsverzögerung:** Entsprechend der Anwendung muss bei der Übertragung eine maximale Verzögerung eingehalten werden. Die tolerierbare Höhe der Verzögerung richtet sich nach der Anwendung. Beispielweise ist für die interaktive Videokommunikation eine maximale Ende-zu-Ende Verzögerung von 150ms anzusetzen, was allerdings die Pufferung und Verarbeitung einschließt. Hinzu kommt eine zusätzliche Anforderung hinsichtlich der Schwankungen der Verzögerung (Jitter). Diese sollten 30ms nicht überschreiten. Für Videostreaming sollte die Übertragungsverzögerung 5s nicht überschreiten [111].
- **Übertragungsverluste:** Übertragungsverluste (z.B. in Form von Paketverlusten) können die erreichbare Videoqualität beträchtlich beeinflussen. Von daher werden hohe Anforderungen gestellt. Für interaktive Videokommunikation sollten die Übertragungsverluste unter 1% liegen, bei Videostreaming unter 5 % [111].

### 2.3.2 Besonderheiten bei der Übertragung skalierbar codierter Videodaten

Wie bereits im Abschnitt 2.2.3 beschrieben, wird bei der skalierbaren Videocodierung das codierte Videosignal in einen Base Layer Bitstrom und einen oder mehrere Enhancement Layer Bitströme codiert. Die Aufgabe der Netzübertragung ist es, diese Bitströme zum Empfänger zu transportieren. Sie können dabei entweder im Multiplex oder getrennt voneinander im Netz übertragen werden. Bei der Multiplexübertragung werden im Sender alle Bitströme zu einem Paketstrom zusammengefasst und einheitlich im Netz behandelt.

Auf der Empfängerseite müssen die verschiedenen Bitströme wieder demultiplext und entsprechend decodiert werden. Vorteil dieser Übertragung ist die Erhaltung der Synchronisation unter den einzelnen Bitströmen während der Übertragung. Allerdings können bei der Multiplexübertragung die Bitströme nicht im Netz differenziert werden. Hierzu ist eine getrennte Übertragung erforderlich, wie sie in Abbildung 2.12 dargestellt ist. Bei der getrennten Übertragung der Bitströme ergibt sich ein höherer Aufwand bei der Synchronisation, da in der Regel im Netz nicht gewährleistet werden kann, dass die einzelnen Ströme synchron übertragen werden. Dies stellt einen Nachteil gegenüber der

Multiplexübertragung dar. Da jedoch jeder Bitstrom entsprechend seiner Priorität übertragen und behandelt werden kann, kann durch diese Servicedifferenzierung die Qualität flexibel an die Übertragungseigenschaften angepasst werden.

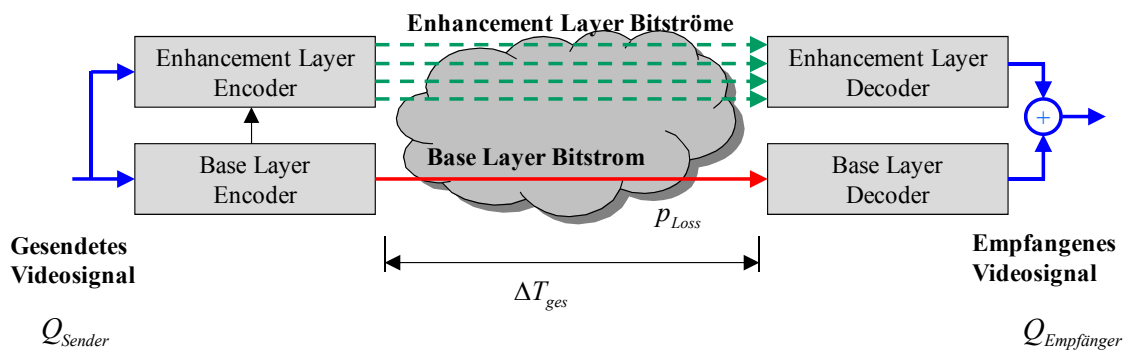


Abbildung 2.12: Getrennte Übertragung skalierbar codierter Bitströme

Für die Übertragung skalierbar codierter Videodaten lassen sich daher zusätzliche Anforderungen ergänzen. Für den Entwurf von geeigneten Übertragungsmethoden müssen vor allem drei Anforderungen berücksichtigt werden:

- **Robustheit:** Es muss eine minimale Basisqualität des übertragenen Videos über einen möglichst breiten Anwendungsbereich abgesichert werden, wofür eine robuste Übertragung mindestens des Base Layer Bitstromes erforderlich ist. Daraus lässt sich ableiten, dass die Verlustrate  $p_{Loss}$  nur sehr gering sein darf. Es gelten hier mindestens die allgemeinen Anforderungen an die Übertragungsverluste ( Siehe Abschnitt 2.3.1 )
- **Qualität und Qualitätsskalierung:** Basierend auf dem aktuellen Qualitätszustand der Netzverbindung soll eine skalierbare Anpassung der resultierenden Videoqualität erfolgen, wobei das Ziel ist, die jeweils maximal erreichbare Qualität am Empfänger  $\max(Q_{Empfänger}) \leq Q_{Sender}$  zu erzielen. Für die skalierbare Anpassung der Qualität am Empfänger  $\Delta Q_{Empfänger}$  müssen die Enhancement Layer Bitströme je nach Priorität und aktueller Leistungsfähigkeit des Netzes differenziert übertragen werden. Die Kriterien für die Videoqualität werden auf der Basis von existierenden Dienstgütemodellen und Qualitätsdefinitionen für Videoanwendungen [134] [78] festgelegt. Die Bewertung der Videoqualität erfolgt dabei auf Basis des Peak Signal to Noise Ratio (PSNR), welches im Abschnitt 2.4



im Detail beschrieben wird. Für eine gute Videoqualität sind PSNR-Werte über 30dB erreicht werden. Die Akzeptanzgrenze für eine minimale Videoqualität liegt bei 25 dB.

- **Verzögerung:** Zum Erreichen der maximalen Qualität müssen alle verfügbaren Layer-Bitströme ohne große Zeitdifferenz beim Empfänger ankommen. Dass heißt, es ist eine einheitliche Ende-zu-Ende Verzögerung  $\Delta T_{ges}$  aller zu decodierenden Layer anzustreben. Die Akzeptanzgrenze bei Videostreaminganwendungen liegt bei 5s. Von guter Qualität kann gesprochen werden, wenn die Verzögerung kleiner als 2s ist.

### 2.3.3 Netz- und systemspezifische Anforderungen

Während die in den vorangegangenen Abschnitten aufgestellten Anforderungen sich auf die Videoübertragung und Videoqualität beziehen, ist es auch erforderlich, Anforderungen aus netzspezifischer Sicht abzuleiten, die für den Entwurf neuer Verfahren wichtige Randbedingungen darstellen. Aus der Analyse der lokalen drahtlosen Vernetzung im Abschnitt 2.2.4 lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass aufgrund der vielen Parameter eine große Anzahl verschiedener Varianten an Netztopologien möglich wird. Aufgrund der vielen Freiheitsgrade sind gleichfalls verschiedene Ansätze für die Klassifizierung der Netze möglich. Grundlegend lassen sich zwei verschiedene Gruppen hierbei einteilen:

- **Netze mit großer Anzahl von Knoten und hoher Dynamik:** Hierbei wird von einer sehr hohen Anzahl von Knoten ausgegangen, die auch über eine hohe Mobilität verfügen. Oftmals ist dies auch mit sehr begrenzten lokalen Ressourcen verbunden, wie im Beispiel der Sensornetze. Neben den geltenden physikalischen Randbedingungen der drahtlosen Übertragung kommen hinsichtlich der Robustheit hier vor allem die aus der Dynamik des Netzes resultierenden Eigenschaften zum Tragen. Typische Fälle sind hier das ständige Hinzukommen und Wegfallen von Netzknoten und der stetige Bedarf nach Routenänderungen. Verbindungen zwischen Knoten im Netz sind in der Regel multi-hop Übertragungen.
- **Stationäre und quasistationäre Netze mit wenigen Knoten:** Hier werden Netze eingeordnet, die über eine geringe Anzahl an Netzknoten verfügen wobei sich diese Knoten hinsichtlich der Mobilität stationär oder quasistationär verhalten. Aus Sicht der Robustheit sind vor allem die physikalischen Effekte der drahtlosen Übertragung zu berücksichtigen. Die Verbindungen im Netz können sowohl single-hop als auch multi-hop Übertragungen sein.

Die Randbedingungen und Parameter in den einzelnen Netzkategorien unterscheiden sich sehr stark. Dies hat auch Auswirkungen auf die Wahl geeigneter Verfahren zur Steigerung der Robustheit. Während es bei den quasistationären Netzen um zeitlich stabile qualitative Links zwischen den Netzknoten ankommt, spielt bei den Netzen mit vielen Teilnehmern eher die Auswahl geeigneter Routen beziehungsweise auch Mehrwegerouten für die Robustheit eine Rolle. Demnach unterscheidet sich auch die Wirksamkeit einzelner Verfahren zur Steigerung der Robustheit. Es wird daher keinen universellen Ansatz geben, der für alle Netzkategorien gleichfalls gilt. Vielmehr muss die Eignung von einzelnen Lösungsansätzen für eine definierte Klasse von Netzen untersucht und zu bewertet werden. Ausgehend von der Betrachtung der relevanten Anwendungsszenarien im Abschnitt 1.2 lässt sich für die im Rahmen der Arbeit zu betrachtenden Netzszenarien die Schlussfolgerung ziehen, dass vor allem eine Eignung eines neuen Verfahrens für stationäre und quasistationäre Netze mit wenigen Knoten anzustreben ist. Basierend auf dieser Annahme lassen sich weitere netz- und systemspezifische Anforderungen ableiten, die wie folgt klassifiziert und formuliert werden können:

**Netztopologie.** Für die betrachteten Netzszenarien muss die Netzwerkarchitektur dezentral ohne eine zentrale steuernde Komponente ausgelegt werden. Da die Komptabilität zu Internettechnologien sehr wichtig ist, muss die Übertragung im Netzwerk paketbasiert und auf Basis des IP-Protokolls stattfinden. Es sind, wie in der Abbildung 2.13 dargestellt, zwei verschiedene Arten von Verbindungen zu unterstützen: (a) single-hop und (b) multi-hop Verbindungen. Es ist dabei davon auszugehen, dass sich einzelne Netzknoten während der Übertragung nicht oder mit einer Geschwindigkeit  $v$  bewegen können. Die räumliche Dimension der Netze kann bis zu mehreren hundert Metern betragen. Hinsichtlich der Kanaleigenschaften sind sowohl Indoor als auch Outdoor Kanäle zu betrachten.

**Selbstoptimierung.** Die Selbstoptimierung ist eine selbstorganisierende Eigenschaft eines Kommunikationssystems. Allgemein versteht man unter der Selbstorganisation die Fähigkeiten eines Systems zur Selbstkonfiguration, Selbstoptimierung, Selbstheilung sowie zum Selbstschutz [52] [91] [126]. Ein Beispiel für die Selbstorganisation ist das Dienstemanagement in ubiquitären Umgebungen [19] [22]. Diese müssen in der Lage sein, dem Benutzer alle aktuell zur Verfügung stehenden Funktionen und Dienste, die er in seiner Situation benötigt, mit der für ihn passenden Konfiguration zur Verfügung zu stellen, ohne dass dabei manuelle Eingaben erforderlich sind. Ausgehend von der verteilten Netzarchitektur müssen bei der Selbstoptimierung Knoten im Netzwerk in der Lage sein,

eine Zielgröße zu optimieren indem sie sich adaptiv an sich ändernde Umgebungsbedingungen anpassen.

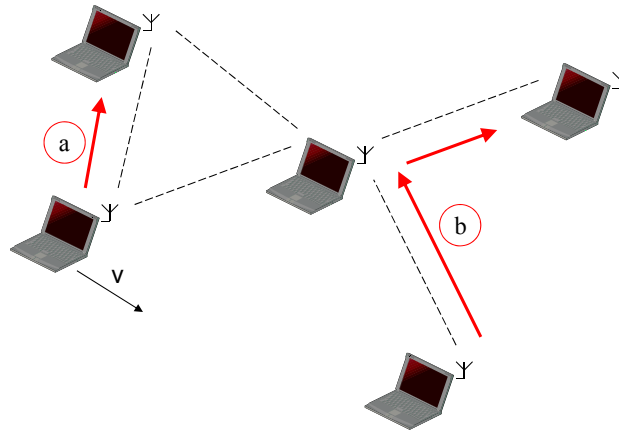


Abbildung 2.13: Netztopologie

## 2.4 Bewertungskriterien

Für den Nachweis der Erfüllung der gestellten Anforderungen, sind qualitative und quantitative Bewertungskriterien erforderlich. Zur Aufstellung dieser Kriterien wurde eine Vorgehensweise in zwei Schritten gewählt. Da sich die Anforderungen vor allem auf den Bereich der Videoebene beziehen, wurden zunächst hierfür geeignete Bewertungskriterien untersucht und ausgewählt. In einem zweiten Schritt wurden Anforderungen und Bewertungskriterien für die Netzebene daraus abgeleitet.

### 2.4.1 Bewertungskriterien der Videoebene

Die Bewertungskriterien der Videoebene beziehen sich auf die Qualitätseigenschaften der Videoanwendung. In der Tabelle 2-3 werden die aufgestellten Kriterien definiert und in Beziehung zu der jeweiligen Anforderung gestellt. In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Bewertungskriterien im Detail beschrieben.

Bewertungskriterium	Anforderung
Robustheitskriterium	Eine minimale Videoqualität soll im gesamten Einsatzbereich erreicht werden.
Qualitätskriterium	Es soll die jeweils maximal mögliche Videoqualität

	erreicht werden.
Qualitätsanpassungskriterium	Die Qualitätsschwankungen im zeitlichen Ablauf einer Sequenz sollen möglichst minimal sein.
Verögerungskriterium	Die Differenzen der Übertragungsverögerungen der einzelnen Layer sollen minimal sein.

Tabelle 2-3: Bewertungskriterien

#### 2.4.1.1 Das Robustheitskriterium

Eine robuste Übertragung skalierbar codierter Videodaten liegt immer dann vor, wenn mindestens der Base Layer empfangen werden kann. Geht der Base Layer eines Frames bei der Übertragung verloren ist dieser Frame ungültig und kann nicht oder nur mit hohen Qualitätsverlusten decodiert werden. Im Vergleich zu den Enhancement Layern ergeben sich für einen verlorenen Base Layer weitere Konsequenzen, da sich der Fehler über die Sequenz fortpflanzt. Durch die hierarchische Abhängigkeit der einzelnen Layer bei der skalierbaren Codierung können weiterhin keine Enhancement Layer bei fehlendem Base Layer decodiert werden. Aus diesem Zusammenhang lässt sich ein Robustheitskriterium  $r_f$  wie in der Formel 2-2 dargestellt ableiten. Die Anzahl der gültig empfangenen Frames, d.h. der Frames bei denen der Base Layer decodierbar ist, wird demnach ins Verhältnis zu den gesendeten Frames gesetzt.

$$r_f = \frac{n_{f_{Base}}}{n_{f_{ges}}} \cdot 100\% \quad (2-2)$$

#### 2.4.1.2 Das Qualitätskriterium

Das Qualitätskriterium dient zur Beschreibung der maximal erreichbaren Videoqualität. Da es nicht auf die Besonderheiten der skalierbaren Videocodierung eingeht, lässt sich ein Maß einsetzen, wie es auch bei der nichtskalierbaren Videocodierung verwendet wird. Ein objektives Maß ist das in [78] vorgestellte Peak Signal to Noise Ratio (PSNR). Das PSNR basiert entsprechend Formel 2-3 auf der Erfassung des mittleren quadratischen Fehlers zwischen einem originalen Videoframe und dem korrespondierenden decodierten Frame. Der Fehler wird ins Verhältnis zum maximalen Signalwert (engl. Peak Signal) gesetzt und

in dB gemessen. Bei einer Auflösung des Videosignals von 8-bit ergibt sich ein Peak Signal von 255. Da mit dem PSNR immer nur die Qualität in Bezug auf einen betrachteten Frame ermittelt werden kann, sind keine Aussagen über Qualitätsschwankungen oder die Isochronität einer empfangenen Videosequenz möglich.

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \frac{M \cdot N \cdot A^2}{\sum_m \sum_n [x(m,n) - y(m,n)]^2} \quad (2-3)$$

### 2.4.1.3 Qualitätsanpassungskriterien

Da die qualitätsskalierbare Videocodierung als neue Eigenschaft die Anpassung der Qualität an gegebene Randbedingungen bietet, reicht die Bestimmung der Videoqualität auf Basis von PSNR nicht aus, um die Güte der Qualitätsanpassung zu bewerten. Daher sind für skalierbare Videocodierung zusätzliche Qualitätsmaße erforderlich. In der Literatur sind verschiedene Ansätze dafür auffindbar. Die wichtigsten werden im Folgenden vorgestellt und charakterisiert. Die Tabelle 2-4 gibt einen Überblick über die berücksichtigten Kriterien.

Qualitätsmaß	Beschreibung	Quellen
PSNR Differenz	Erfassung der Qualitätsschwankungen durch Messung des PSNR zwischen angrenzenden Frames mit Erfassung der maximalen Schwankung in einer Sequenz	[143]
Qualitätsstandardabweichung	Standardabweichung des mittlere quadratischen Fehlers bzw. vom PSNR	[98]
Laufängenmaße	Spezialmaße für skalierbares Video, beruhend auf empirischen subjektiven Annahmen	[75]

Tabelle 2-4: Erweiterte Qualitätskriterien für skalierbares Video

#### PSNR-Differenz

Dieses Kriterium betrachtet die mittlere Qualitätsdifferenz von zwei aufeinanderfolgenden Frames, wobei die Qualität als PSNR erfasst wird (Siehe Formel 2-4). Das Maß bietet eine relativ simple Möglichkeit, Qualitätsschwankungen über einen sehr kurzen Zeitraum zu

ermitteln. Es kann sowohl für nichtskalierbare als auch skalierbare Videocodierung verwendet werden, wobei keine Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften der qualitätsskalierbaren Videocodierung erfolgt.

$$MAD_{PSNR} = \max(|PSNR_n - PSNR_{n-1}|) \quad (2-4)$$

### Qualitätsstandardabweichung

Ein ebenfalls an den mittleren quadratischen Fehler angelehntes Maß ist die Standardabweichung  $\sigma_Q$  der Qualität. Diese liefert im Gegensatz zur PSNR-Differenz eine zusammengefasste Aussage über Qualitätsschwankungen innerhalb einer Sequenz von K-Frames. Die Berechnung erfolgt anhand der Formeln 2-5 bis 2-8.

$$\sigma_Q = 10 \cdot \log_{10} \sqrt{\sigma_M^2} \quad (2-5)$$

$$\sigma_M^2 = \frac{1}{K-1} \sum_{k=0}^{K-1} (M_k - \bar{M})^2 \quad (2-6)$$

$$M_n = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [x(m, n) - y(m, n)]^2 \quad (2-7)$$

$$\bar{M} = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} M_k \quad (2-8)$$

### Laufängenmaße:

Einen Bewertungsansatz zur gezielten Betrachtung der Eigenschaften von qualitätsskalierbarer Videocodierung bieten die Laufängenmaße, wie sie in [75] vorgestellt werden. Im Vergleich zu den qualitätsorientierten Ansätzen wird hierbei lediglich die Verfügbarkeit der einzelnen Videolayer für die Decodierung betrachtet. Dies ist beispielhaft in der Abbildung 2.14 dargestellt.

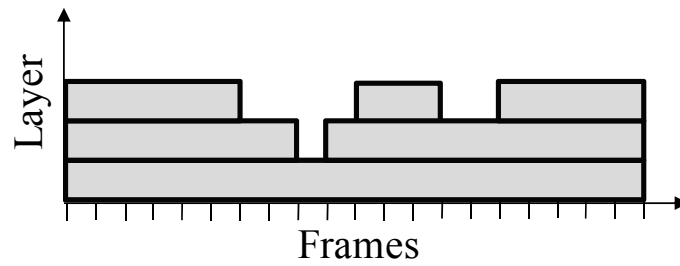


Abbildung 2.14: Lauflängen verschiedener Videolayer

In dem gezeigten Beispiel sind die Layer 0 und 1 durchgängig verfügbar, das heißt, es ist eine mittlere Videoqualität abgesichert. Der Layer 3 ist nur zu bestimmten Zeitpunkten für die Decodierung verfügbar, was zu Qualitätsschwankungen führt. Die Lauflängenmaße bewerten die Zeitdauer und die Frequenz der Verfügbarkeit der einzelnen Videolayer. Zur quantitativen Erfassung wird in [75] die Definition eines Laufes  $r$  als die Menge aufeinanderfolgender Frames bezogen auf einen Layer vorgenommen. Die zusammengefasste Betrachtung aller Runs in einer Sequenz erfolgt durch drei eingeführte Metriken: *avgrun* (Mittlere Lauflänge), *minrun* (minimale Lauflänge) und *exp run* (Erwartungswert der Lauflänge für einen beliebigen Frame).

$$avgrun = \frac{r_1 + r_2 + \dots + r_k}{k \cdot N} \quad (2-9)$$

$$\min run = \frac{\min\{r_1, r_2, \dots, r_k\}}{N} \quad (2-10)$$

$$\exp run = \frac{r_1^2 + r_2^2 + \dots + r_k^2}{N^2} \quad (2-11)$$

### Bewertung und Verwendung der verfügbaren Kriterien

Die Lauflängenmaße eignen sich prinzipiell für Detailbetrachtungen bei der skalierbaren Videocodierung und Übertragung, da sie auf jeden Layer einzeln angewendet werden. Für eine zusammenfassende Bewertung sind sie eher ungeeignet, da kein geschlossener Wert pro Frame vorliegt. Die PSNR-Differenz kann nur immer den Augenblickswert der Qualitätsschwankungen aufeinanderfolgender Frames beschreiben. Daher wird für eine geschlossene Bewertung der Qualitätsanpassung für komplette Sequenzen der Einsatz der Qualitätsstandardabweichung nach [98] ausgewählt.

#### 2.4.1.4 Das Verzögerungskriterium

Für eine qualitative Gesamtbewertung von Videosequenzen zählt neben der messbaren Videoqualität auch die Betrachtung der Verzögerung (*engl.* Delay) bei der Übertragung zwischen Quelle und Anzeige. Da, wie auch im Abschnitt 2.2.2 dargestellt, bei der Übertragungsverzögerung Schwankungen auftreten können, ist es erforderlich, Puffer im Übertragungsweg der Videodaten vorzusehen. Ziel bei der Dimensionierung der Puffer ist Absicherung eines flüssigen Abspielens der decodierten Videosequenz bei Einfügen einer möglichst minimalen zusätzlichen Pufferverzögerung. In [105] wird beispielsweise ein Ansatz zur Pufferdimensionierung für nichtskalierbares Video vorgestellt, der insbesondere auf die Übertragungseigenschaften in drahtlosen Netzen berücksichtigt. Da bei der Übertragung skalierbar codierter Videodaten mehrere Bitströme übertragen werden, treten verschiedene Übertragungsverzögerungen auf. Daher ist hier das Ziel, den Versatz der Verzögerungen der einzelnen Bitströme bei der Übertragung minimal zu halten, um in Summe eine minimale Gesamtverzögerung zu erreichen. In [120] wird als Maß für den Versatz die Standardabweichung der Verzögerungen vorgeschlagen. Eine Optimierung der Verzögerung wird durch Minimierung dieses Kriteriums erreicht.

Das Verzögerungskriterium wird im Rahmen der Arbeit als Randbedingung bzw. Kostenkriterium herangezogen, da das primäre Ziel im Erreichen einer möglichst maximalen Videoqualität besteht. Allerdings können unterschiedliche Verfahren zur Qualitätsoptimierung verschiedene Verzögerungen in die Übertragungskette einfügen. Ein fairer Vergleich ist daher nur unter Einbeziehung der erreichbaren Gesamtübertragungsverzögerung möglich. Die Berücksichtigung des Verzögerungskriteriums bei den Auswertungen wird durch Vorgabe eines einheitlichen Decoderpuffers realisiert.

### 2.4.2 Bewertungskriterien der Netzebene

Ausgehend von den in Abschnitt 2.2.4 aufgezeigten Eigenschaften der drahtlosen Vernetzung und den in Abschnitt 2.3 analysierten Anforderungen der Videoebene werden Anforderungen und Bewertungskriterien für die Netzebene abgeleitet. Diese Kriterien dienen zur Bewertung und Vorqualifizierung von Verfahren der Netzebene und für Aussagen über eine prinzipielle Eignung von eingesetzten Übertragungsverfahren, Transportprotokollen und QoS-Mechanismen.

Die Qualitätsparameter der Videoebene ergeben sich aus der Verfügbarkeit von Videodaten am Decoder. Daher ist fest davon auszugehen, dass die Paketfehlerraten auf



der Netzebene einen direkten Einfluss auf die Qualitätsparameter der Videoebene haben. Bei einer paketbasierten Übertragung in einem drahtlosen lokalen Netzwerk bedeutet dies eine Abhängigkeit der Videoqualität von der Paketfehlerrate PER. Wie in [90] beschrieben, kann die PER messtechnisch erfasst werden. Dabei werden die fehlerhaft empfangenen Pakete im Verhältnis zu einer Menge insgesamt gesendeter Pakete erfasst (Formel 2-12).

$$P_{PER} = \frac{n_{P_{Fehler}}}{n_{P_{ges}}} \quad (2-12)$$

Dabei ist die Genauigkeit der Messung von der Anzahl der betrachteten Pakete abhängig. Die theoretische Grenze liegt beim Übergang  $n_{P_{ges}} \rightarrow \infty$ , wobei dann die Paketfehlerrate der Paketverlustwahrscheinlichkeit entspricht. Da diese nicht bekannt ist und auch nicht in der Praxis ermittelt werden kann, ist die Erfassung der PER über eine Anzahl von Paketen immer fehlerbehaftet. Eine Qualität der PER-Messung kann durch die Einführung eines Konfidenzintervalls erreicht werden [90] [106]. Durch dieses kann mit einer hohen statistischen Sicherheit die Lage eines messtechnisch erfassten PER-Wertes in einem bestimmten Bereich angegeben werden. Eine Berechnung des Konfidenzintervalls ist nach [106] nach (2-13) und (2-14) möglich, wobei der Parameter  $t_{m;q}$  die Verwendung der Studentischen t-Verteilung der Ordnung q mit m Freiheitsgraden angibt.

$$P_{PER_{gu}} = \bar{P}_{PER} - t_{m;q} \cdot \frac{S_{PER}}{\sqrt{n_{Mess}}} \quad (2-13)$$

$$P_{PER_{go}} = \bar{P}_{PER} + t_{m;q} \cdot \frac{S_{PER}}{\sqrt{n_{Mess}}} \quad (2-14)$$

Zur Erfüllung der Anforderungen der Videoebene müssen die Paketfehlerraten für den Transport der einzelnen Videolayer auf der Netzebene ein bestimmtes Verhalten aufweisen. Das Idealverhalten ist beispielhaft in der Abbildung 2.15 dargestellt, wobei eine Übertragung von einem Base Layer mit drei Enhancement Layern ausgegangen wird. Der Arbeitsbereich wird dabei als Entfernungsbereich zwischen Sender und Empfänger betrachtet. Es sollten sich idealerweise fünf verschiedene Bereiche ergeben, in denen die Videoqualität skalierbar eingestellt werden kann. Im Bereich 1 können alle Layer für die Decodierung verwendet werden, woraus sich eine maximale Videoqualität ergibt. In den Bereichen 2 bis 4 stehen jeweils entsprechend weniger Videolayer für die Decodierung zur Verfügung, woraus sich eine reduzierte aber robuste Videoqualität ergibt. Im Bereich 5

kann kein Base Layer mehr übertragen werden, dass heißt, hier ist keine stabile Videoübertragung und damit Decodierung mehr möglich.

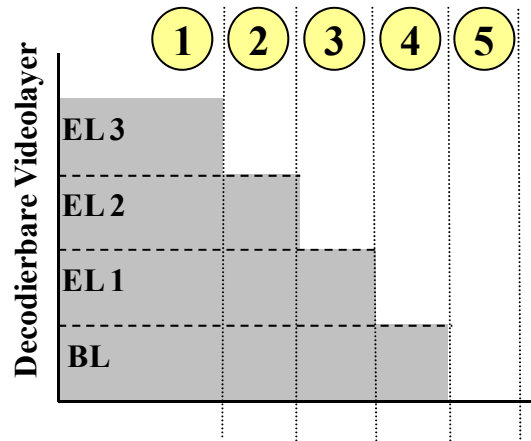


Abbildung 2.15: Ableitung von Anforderungen für die Netzebene

Ausgehend von der Abbildung 2.15 kann als Vergleichsmetrik für verschiedene Verfahren der Einsatzbereich für die einzelnen Videolayer herangezogen werden. Dieser definiert die maximale Entfernung des Empfängers vom Sender bei dem ein Videolayer noch nutzbar ist. Führt man entsprechend der Formel 2-15 eine maximal akzeptable Paketfehlerrate  $\varepsilon$  für einen Videolayer ein, ist das Verfahren einsetzbar, wenn die mittlere Paketfehlerrate  $\bar{P}_{PER_i}$  für einen bestimmten Layer  $i$  und eine bestimmte Entfernung unter diesem festgelegten Maximum liegt.

$$\bar{P}_{PER_i} \leq \varepsilon \quad (2-15)$$

Ausgehend von den so definierten Einsatzbereichen lassen sich drei Kriterien definieren, auf deren Basis Verfahren miteinander verglichen werden können:

- **Maximalleistung.** Die Maximalleistung definiert den Bereich in dem eine maximale Qualität erwartet werden kann. Das heißt, alle Layer müssen in diesem Bereich empfangbar sein. Die Bedingung nach Formel 3-14 muss für alle übertragenen Klassen gelten.
- **Robustheit.** Die Robustheit definiert den Bereich in dem eine minimale Qualität abgesichert werden kann. Hierbei muss mindestens der Base Layer decodierbar

sein, das heißt, die Bedingung entsprechend Formel 2-15 muss mindestens für die Klasse des Base Layer erfüllt sein.

- **Skalierung.** Die Skalierung definiert das Verhalten in den dazwischenliegenden Bereichen. Hierbei sollte die Differenz der angrenzenden Bereiche untereinander im Mittel möglichst groß sein um eine gleichmäßige Abstufung der Videoqualität zu erreichen. In der Abbildung 2.15 ist eine ideale Skalierung dargestellt, da hier alle zwischenliegenden Bereiche gleich groß sind.

Da nicht alle drei Kriterien gleichzeitig optimal sein können, ist zur Bewertung verschiedener Verfahren eine empirische Auswertung aus der Konstellation der Einzelkriterien erforderlich. Zum Beispiel ist eine hohe Maximalleistung für die zu erwartende Videoqualität prinzipiell besser als eine hohe Skalierung, allerdings können dann die Vorteile einer skalierbaren Videocodierung nicht umfassend ausgenutzt werden.

### 2.4.3 Zusammenfassung und Fazit

Zur Bewertung der Anforderungserfüllung bei der Übertragung skalierbar codierter Videodaten lassen sich quantitative Kriterien definieren. Dabei sind Kriterien auf der Video- und auf der Netzebene zu unterscheiden. Durch die Kriterien auf der Netzebene lassen sich notwendige Bedingungen für das Erreichen einer robusten Videoübertragung erfassen und bewerten. Sie können daher für die Vorqualifizierung verwendet werden, sind aber nicht hinreichend für die Bewertung der erreichbaren Qualität auf der Videoebene. Auf dieser Ebene sind eigens dafür definierte Kriterien erforderlich. Neben der eigentlichen Videoqualität lässt sich auch die Qualitätsskalierung messtechnisch erfassen und quantitativ bewerten. Hierfür gibt es verschiedene Ansätze. Für die übergreifende Bewertung einer gesamten Sequenz stellt die Qualitätsstandardabweichung ein adäquates Maß dar.

## 2.5 Stand der Wissenschaft und Technik

### 2.5.1 Einordnung und Systematisierung

Die zum aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik existierenden Ansätze für die Übertragung skalierbar codierter Videodaten unterscheiden sich wesentlich durch die Einordnung in die verschiedenen Schichten des ISO/OSI Modells. Demnach lassen sich, wie

in der Abbildung 2.16 dargestellt, grundlegend zwei verschiedene Ansätze unterscheiden: Ende-zu-Ende Verfahren und Cross-Layer Verfahren.

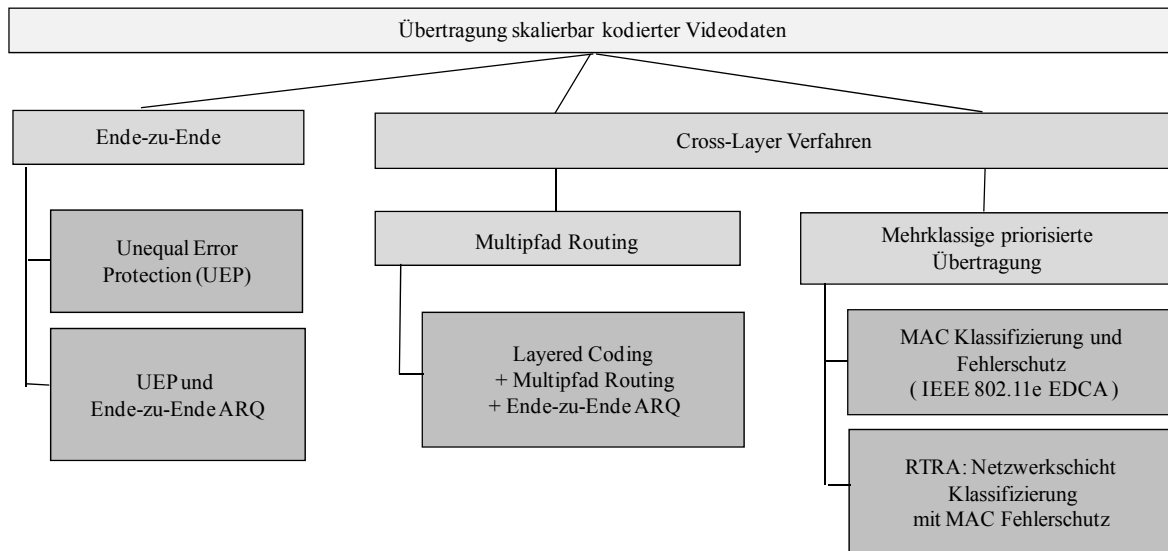


Abbildung 2.16: Einordnung von Architekturansätzen

Ende-zu-Ende Verfahren arbeiten nur im Sender und Empfänger ohne Funktionen des Netzes einzubeziehen. Sie sind damit der Anwendungsschicht des ISO/OSI Modells zuzuordnen. Wichtigstes Beispiel ist die ungleichgewichtete Behandlung der einzelnen Bitströme durch paketbasierte Fehlerschutzcodierung oder Unequal Error Protection (UEP). Die UEP Verfahren wurden vor allem für die Übertragung skalierbar codierter Videodaten im Internet konzipiert (z.B. [26]). Im Gegensatz zu den Ende-zu-Ende Verfahren arbeiten die Cross-Layer Verfahren auf mehreren Schichten des ISO/OSI Modells. Ziel ist es, Mechanismen auf den einzelnen OSI-Schichten optimal für die Unterstützung einer Anwendung aufeinander anzupassen und in Summe zu optimieren. Diese Verfahren kommen vor allem für drahtlose Netze in Betracht, da es hier insbesondere notwendig ist, die Anforderungen von Multimedia Anwendungen auch in den unteren Schichten des ISO/OSI Modells explizit zu berücksichtigen [112] [114]. Je nachdem, über welche Schichten sich die Verfahren erstrecken, lassen sich verschiedene Unterkategorien unterscheiden. Eine Einteilung bezüglich der Übertragung skalierbar codierter Videodaten lässt sich anhand der Ansätze zur differenzierten Unterstützung der einzelnen Videolayer treffen. Wichtige Vertreter sind demnach Verfahren auf Basis von Multipfad Routing und prioritätsbasiertem Scheduling. Beim Multipfad Routing werden die Videolayer auf verschiedenen Pfaden vom Sender zum Empfänger durch das Netz geführt [18] [69]. Die

Wahl der Pfade wird dabei mit der Videocodierung abgestimmt. Beim prioritätsbasierten Scheduling werden die Videolayer in einem Netzknoten je nach Priorität verschiedenen Klassen zugeordnet, die differenziert behandelt werden. Beispiele dafür sind [64] oder [141]. Die Abbildung 2.16 fasst alle untersuchten Verfahren in einer Übersicht zusammen. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Ansätze detailliert beschrieben.

## 2.5.2 Ende-zu-Ende Verfahren

Reine Ende-zu-Ende Verfahren arbeiten in den Endgeräten und betrachten das Übertragungsnetz nur aufgrund der resultierenden Ende-zu-Ende Übertragungsparameter. Diese Verfahren setzen daher keine detaillierte Kenntnis von der Struktur und Arbeitsweise des Netzes voraus. Eine allgemeingültige Architektur für Ende-zu-Ende Verfahren wird in der Abbildung 2.17 dargestellt. Alle zu übertragenden Bitströme werden im Sender in einem Multiplexer zu einem integrierten Datenstrom zusammengeführt und gemeinsam im Netz übertragen. Eine Klassifikation hinsichtlich verschiedener Prioritäten muss dafür ebenfalls im Sender erfolgen. Für den optimierten Einsatz in drahtlosen Netzen sind Ende-zu-Ende Architekturen nur bedingt geeignet. Das liegt in der Tatsache begründet, dass für die drahtlose Übertragung eine hohe Adaptivität gefordert wird. Diese kann je nach Anwendungsszenario nicht oder nur schwer erreicht werden. Insbesondere gilt dies beim Einsatz in multi-hop Netzen, in Netzen mit hoher Knotenanzahl und in Netzen mit hoher Bewegung. Typische Vertreter dieses Architekturansatzes sind die Verfahren der Unequal Error Protection, wie sie im Abschnitt 2.5.2.1 beschrieben werden.

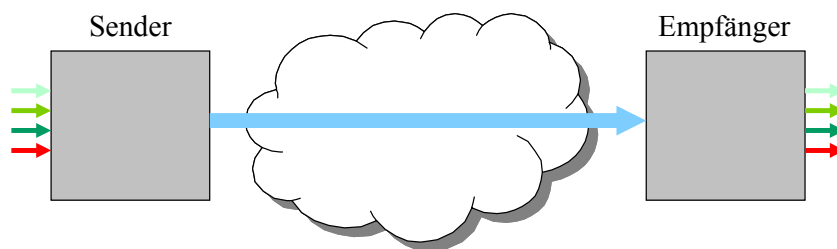


Abbildung 2.17: Architektur der Ende-zu-Ende Verfahren

### 2.5.2.1 Verfahren auf Basis von Unequal Error Protection

Unter Unequal Error Protection ist in der Kommunikationstechnik ein ungleichgewichteter Fehlerschutz für mehrere zusammengehörige Bitströme mit verschiedenen Prioritäten zu verstehen. Weit verbreitet sind UEP-Verfahren auf Basis einer Fehlerschutzcodierung auf Paketebene. Derartige Verfahren wurden in erster Linie für die paketbasierte Übertragung von Multimediadaten über ein Internet ohne Quality-of-Service Mechanismen aber auch

für drahtlose Netze vorgesehen. Für die Übertragung skalierbar codierter Videodaten existieren Ansätze für Layered Coding [17] [26] [103] [108] aber auch für Fine Granularity Scalability [116] [123]. Stuhlmüller stellt in [108] eine grundlegende Beschreibung der Architektur und Zusammenhänge bei der Unequal Error Protection vor. Die Funktionsweise des dort verwendeten Codierers ist in der Abbildung 2.18 dargestellt. Die Bitströme der verschiedenen Videolayer werden vor der Paketierung und Fehlerschutzcodierung in verschiedenen Bereichen eines Puffers zwischengespeichert. Diese Datenbereiche sind verschieden groß, da sie mit verschiedenen Anteilen an Redundanzdaten für die Fehlerschutzcodierung zu einem einheitlichen Puffer befüllt werden. Durch diese verschiedene Gewichtung zwischen Nutz- und Redundanzdaten wird eine unterschiedliche Stärke des Fehlerschutzes erreicht. Aus dem Puffer werden nach der Fehlerschutzcodierung, wie in Abbildung 2.18 dargestellt, Pakete versendet. Als Fehlerschutzcodierer werden in der Literatur vor allem zyklische Blockcodierer, wie der Reed-Solomon Codec (Siehe zum Beispiel [83]) verwendet. Neuere Ansätze nutzen auch Raptor Codes [101], da diese mit einem geringeren Overhead arbeiten und somit eine höhere Codiereffizienz besitzen.

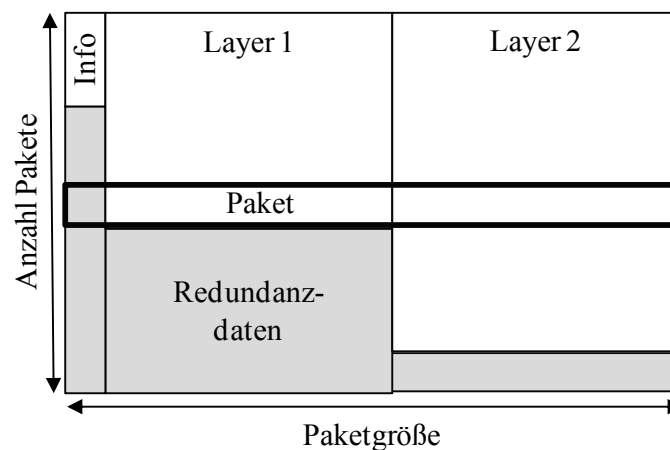


Abbildung 2.18: Unequal Error Protection auf Paketebene

Da die Verfahren für die Unequal Error Protection ohne direkte Interaktionen mit dem Netz arbeiten, sind sie sehr flexibel einsetzbar. Eine Implementierung braucht nur in den Endgeräten zu erfolgen. Da sie die verschiedenen Bitströme im Multiplex übertragen, bleibt auch deren Synchronisation erhalten. Durch die Pufferung für die Fehlerschutzcodierung erhöht sich jedoch die Übertragungsverzögerung. Einen weiteren Nachteil stellt die mangelnde Adaptivität der Verfahren dar. Obwohl sie prinzipiell

dynamisch durch Größenverschiebungen der Speicherbereiche des Codierpuffers anpassbar sind, ergibt sich durch die Ende-zu-Ende Architektur eine hohe Verzögerung der Reaktionszeit auf Veränderungen im Netz. Dies kann insbesondere bei drahtlosen multi-hop Netzen dazu führen, dass die optimale Codierstrategie nicht schnell genug an die Änderungen im Netz angepasst werden kann.

### 2.5.2.2 Kombination von UEP und ARQ

Neben den rein auf Codierung beruhenden UEP-Verfahren sind auch Mischformen für spezielle Anwendungsbereiche bekannt. So kann zum Beispiel, wie im Verfahren nach Zhang [141] beschrieben, für die Übertragung skalierbar codierter Videodaten eine Kombination aus Unequal Error Protection und dem ARQ-Protokoll verwendet werden. Diese Kombination wird in [141] für den Einsatz im Mobilfunk erprobt. Das Prinzip ist in der Abbildung 2.19 dargestellt. Ein spezieller progressiver FGS Encoder produziert einen Base Layer und mehrere Enhancement Layer. Der Base Layer wird durch ein spezielles hybrides Verfahren aus FEC und ARQ mit einem besonderen Fehlerschutz versehen. Die Enhancement Layer werden durch ein UEP Verfahren geschützt. Die so entstehenden Paketströme werden in einem Multiplexer zusammengeführt und über einen 3G Mobilfunkkanal übertragen. Auf der Empfängerseite erfolgt eine entsprechende Decodierung.

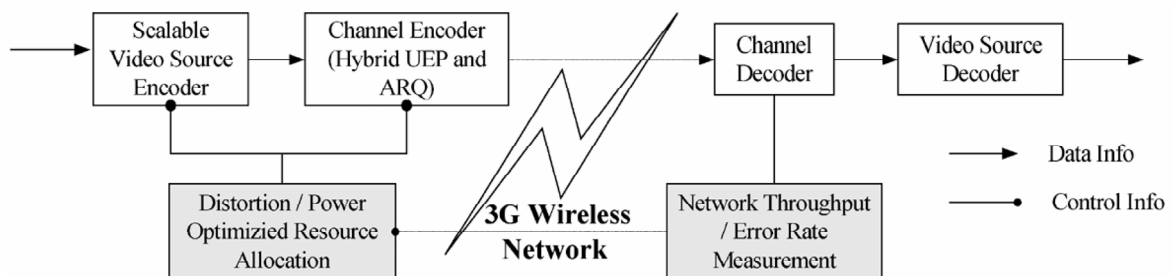


Abbildung 2.19: Architektur des Verfahrens nach Zhang [141]

Das in [141] vorgestellte Verfahren ist als Spezialverfahren anzusehen. Es wurde für den Einsatz im Mobilfunk konzipiert und verifiziert. Bei einer Adaption auf andere Netze ist es als Ende-zu-Ende Verfahren einzuordnen. Ein Nachweis für eine übergreifende Eignung ist nicht bekannt. Aufgrund der starken Fokussierung auf Mobilfunkanwendungen mit spezifischen Medienzugriffsverfahren sowie dem Einsatz proprietärer Spezialcodecs (Progressive FGS) wird es nicht näher in Betracht gezogen.

### 2.5.3 Verfahren auf Basis von Multipfad-Routing

Cross-Layer Verfahren betrachten Aspekte verschiedener Schichten des ISO/OSI Modells im Zusammenhang. Dabei können alle Schichten durchgängig oder nur bestimmte Schichten einbezogen werden. Cross-Layer Multipfad Routing Verfahren konzentrieren sich auf eine kombinierte Betrachtung der Anwendungs- und der Netzwerkschicht. Da bei der skalierbaren Videocodierung verschiedene Bitströme erzeugt werden, können diese, wie in der Abbildung 2.20 dargestellt, beim Multipfad Routing über verschiedene Routen übertragen werden. Cross-Layer Architekturen mit Multipfad Routing eignen sich vor allem bei einer hohen Teilnehmerzahl und hoher Netzdynamik, das heißt einer hohen Bewegungsgeschwindigkeit der Teilnehmer. Eine hohe Teilnehmerzahl (Anzahl der Netzknoten) ist für diese Verfahren auch erforderlich, da für jede Ende-zu-Ende Verbindung mehrere disjunkte Pfade durch ein Netz benötigt werden. Ohne diese Bedingung kann der Vorteil der Verfahren nicht ausgenutzt werden. In den betrachteten Netzszenarien wird diese Bedingung nicht erfüllt. Aus Sicht der Anforderungen an die Übertragung skalierbar codierter Videodaten ergibt sich ein weiterer Nachteil dadurch, dass die hierarchische Abhängigkeit der einzelnen Layer-Bitströme bei einer Gleichgewichtung der einzelnen Routen nicht berücksichtigt wird. Von daher eignen sich Multipfad Routing Verfahren besser für eine Kombination mit Multiple Description Coding, da für skalierbare Codierung spezielle Ergänzungen erforderlich sind, wie sie beispielsweise im Verfahren von Mao [69] spezifiziert wurden, das im Abschnitt 2.5.3 erläutert wurde.

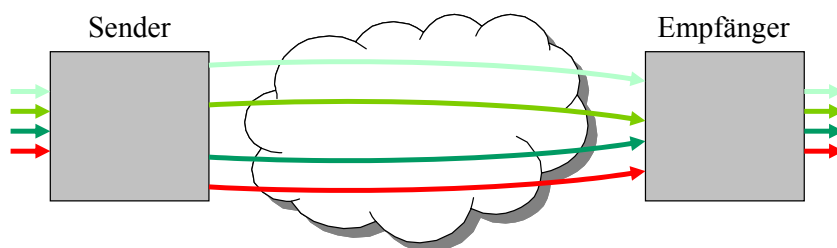


Abbildung 2.20: Architektur von Cross-Layer Multipfad Routing Verfahren

Die Verfahren auf Basis von Multipfad-Routing sind den Cross-Layer Verfahren zuzuordnen, da sie Eigenschaften der Anwendungsebene mit Mechanismen der Netzebene verbinden. Aus der Literatur sind Verfahren sowohl für Layered Coding als auch für Multiple Description Coding bekannt. Da Letztere nicht im zentralen Fokus des Themas



stehen, werden sie hier nur am Rande erwähnt. Multipfad-Routing ist dadurch charakterisiert, dass eine Ende-zu-Ende Verbindung über verschiedene disjunkte Pfade durch das Netz übertragen wird. Derartige Routing-Protokolle, wie zum Beispiel das AOMDV-Protokoll [71], wurden vor allem für die Anwendung in drahtlosen multi-hop Ad-hoc Netzen konzipiert. Der Vorteil der Protokolle beruht vor allem auf der erhöhten Robustheit der Übertragung, da durch die verschiedenen Pfade durch das Netz eine redundante Übertragung ermöglicht wird. Damit Anwendungen davon profitieren, sind spezielle Mapping-Verfahren erforderlich. Einen Ansatz zur Übertragung von skalierbar codierten Bitströmen (Layered Coding) unter Nutzung des Multipfad Routings stellt Mao in [69] vor. Das Prinzip des Verfahrens zeigt die Abbildung 2.21. Base Layer und Enhancement Layer werden auf verschiedenen Pfaden übertragen. Gehen Pakete des Base Layers bei der Übertragung verloren, werden sie auf einem alternativen Pfad erneut übertragen.

Passender als bei Layered Coding ist die Kombination des Multipfad-Routings mit dem Multiple Description Coding. Hierbei werden durch den Videoencoder verschiedene gleichpriorisierte Bitströme erzeugt, die über verschiedene Pfade durch das Netz transportiert werden. Ein Beispiel hierfür ist das Verfahren nach Gogate in [18].

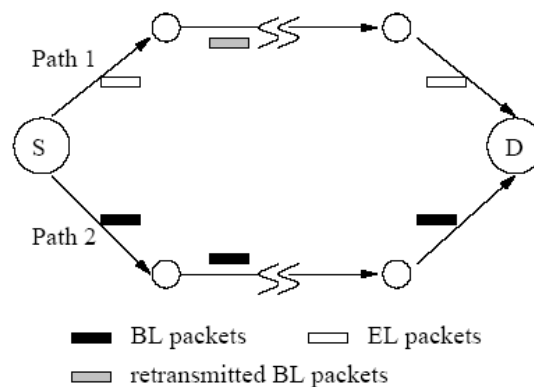


Abbildung 2.21: Prinzip des Verfahrens nach Mao [69]

Ein wesentlicher Vorteil des Multipfad-Routings besteht in der Steigerung der Robustheit vor allem auch bei sich ständig ändernden Netzbedingungen. Dies konnte durch verschiedene Untersuchungen am Rande der Arbeit auch nachgewiesen werden [45]. Allerdings lassen sich diese Vorteile nur dann nutzen, wenn das Netz eine ausreichende Anzahl an Knoten für möglichst viele disjunkte Pfade enthält. Da dies jedoch nicht immer vorausgesetzt werden kann, sind Multipfad-Routing Verfahren in erster Linie für große Netze von Vorteil. Da aber auch unter der Voraussetzung einer geeigneten Netzgröße für

eine möglichst feingranulare Skalierung (FGS) eine hohe Zahl an Pfaden verwaltet werden muss, sind Multipfad-Routing Verfahren allein hierfür nicht ausreichend.

### 2.5.4 Verfahren auf der Basis mehrklassiger priorisierter Übertragung

Eine andere Art des Cross-Layer Ansatzes ist die Nutzung einer mehrklassigen priorisierten Übertragung für verschiedene Bitströme der skalierbaren Videocodierung. Dabei werden, wie in der Abbildung 2.22 dargestellt, alle Bitströme entlang einer Route jedoch mit verschiedenen Prioritäten übertragen.

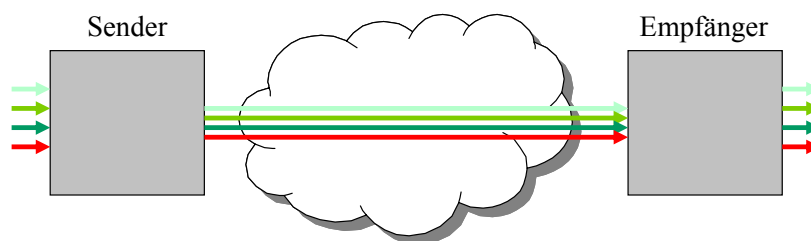


Abbildung 2.22: Architektur für eine mehrklassige priorisierte Übertragung

Der Vorteil dieser Architektur ist eine gute Unterstützung der hierarchischen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Layern durch die Priorisierung. Weiterhin ist der Ansatz im Vergleich zu Multipfad-Ansätzen unabhängig von der Anzahl der Knoten und damit auch für kleinere Netze bzw. single-hop Übertragungen geeignet. Bei Kombination dieser Architektur mit adaptiven Verfahren auf unteren Netzschichten (zum Beispiel in der MAC-Schicht) eignet sich dieser Ansatz sehr gut für eine Abbildung der Qualitätsskalierung der Videoanwendung anhand der Übertragungsqualität des drahtlosen Netzes. Beispiele für Verfahren, die diesen Ansatz nutzen, sind in den Abschnitten 2.5.4.1 und 2.5.4.2 beschriebenen Verfahren [56] [59] [64].

#### 2.5.4.1 Standardverfahren nach IEEE 802.11e

Für die Übertragung skalierbar codierter Videodaten in drahtlosen lokalen Netzen bietet sich eine mehrklassige priorisierte Übertragung an. Da hierbei ebenfalls eine Anpassung verschiedener Netzschichten und der Anwendungsschicht erfolgen muss, sind diese Verfahren auch den Cross-Layer Verfahren zuzuordnen. Im Fall von WLAN bietet sich eine standardkonforme Übertragung nach IEEE 802.11e [35] an.

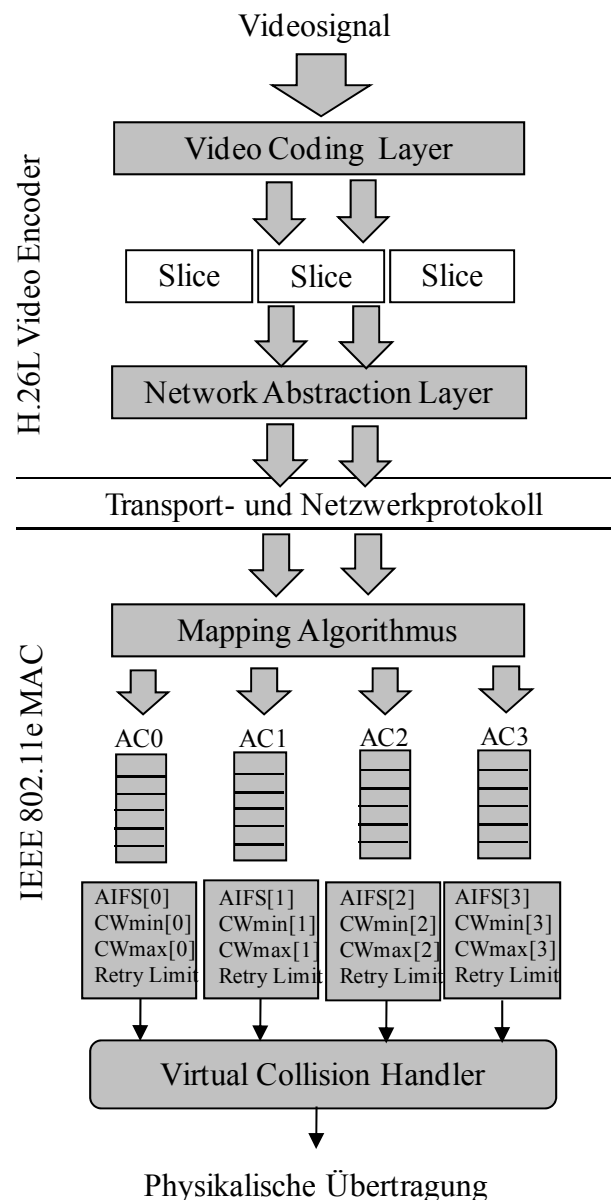


Abbildung 2.23: Übertragung skalierbar codierter Videodaten mit IEEE 802.11e nach [58]

Ein Verfahren, um beispielsweise eine skalierbare Codierung im Standard H.26L<sup>2</sup> mit einer Übertragung auf Basis von IEEE 802.11e zu kombinieren, wird in [58] und [59] vorgestellt. Dabei werden ein Base Layer und zwei Enhancement Layer auf verschiedene Transportklassen (Access Categories) gemappt. Den verschiedenen Access Categories werden spezifische MAC Parameter (AIFS und CW) zugewiesen, so dass eine Quality-of-

<sup>2</sup> In den frühen Phasen der Standardisierung wurde H.264 als H.26L bezeichnet.

Service Differenzierung möglich ist. Eine Differenzierung des Fehlerschutzes zwischen den Access Categories erfolgt nicht. Das Prinzip aus [56] wird in der Abbildung 2.23 dargestellt. Das Verfahren bietet einen effizienten Ansatz zur Differenzierung der einzelnen Videolayer. Dabei wird vor allem die priorisierte Verarbeitung bei hoher Last angestrebt. Beim Fehlerschutz werden keine Adaptivität und keine Priorisierung vorgesehen.

#### **2.5.4.2 Das RTRA Verfahren**

Einen umfassenden Cross-Layer Ansatz für die Übertragung skalierbar codierter Videodaten in drahtlosen lokalen Netzen stellt das RTRA-Verfahren (Realtime Retry Adaptation) aus [64] dar. Es kombiniert die priorisierte Behandlung der einzelnen Videolayer durch einen priorisierenden Scheduler und eine adaptive Anpassung der Retry Limits für die einzelnen Layer auf Basis eines Optimierungsverfahrens. Zusätzlich wird ein Filter integriert, der auf Basis der Abhängigkeiten zwischen den Videolayern ungültige Daten verwirft und somit zu einer zusätzlichen Lastreduktion bei Übertragungsfehlern sorgt. Das Prinzip des RTRA Verfahrens ist in der Abbildung 2.24 dargestellt. Verschiedene Videolayer der Anwendungsschicht werden auf verschiedene Warteschlangen in der Netzschicht verteilt. Zuvor prüft ein Filter die Gültigkeit der einzelnen Pakete. Wurden bereits Pakete eines Frames in einem höherprioreren Layer verworfen werden alle davon abhängigen Pakete niederpriorer Layer ebenfalls verworfen, da der Videodecoder sie nicht mehr nutzen kann. Die Warteschlangen werden durch einen priorisierenden PQ-Scheduler (Priority Queueing) verarbeitet. Zusätzlich wird für jeden einzelnen Layer eine spezifische Fehlerschutzeinstellung durch Adaption des Retry Limits vorgenommen. Dafür nutzt RTRA ein Optimierungsverfahren bei dem die minimale Paketfehlerrate als Minimum der Übertragungs- und Überlastverluste in Abhängigkeit vom eingestellten Retry Limit berechnet wird.

Der Vorteil des Verfahrens besteht in der sehr guten Eignung für die Übertragung feinskalierbar codierter Videodaten da eine beliebige Anzahl von Layern flexibel unterstützt werden kann. RTRA spezifiziert kein Mapping auf ein spezielles MAC-Verfahren, so dass für die Übertragung im WLAN beispielsweise eine Kombination mit der DCF vorzusehen ist. Im Gegensatz zum Verfahren nach IEEE 802.11e erfolgt bei RTRA eine Differenzierung nur im lokalen Knoten und nicht netzweit, da das Scheduling auf der Netzebene erfolgt. RTRA ist das einzige Verfahren der mehrklassigen Übertragung, dass auch eine adaptive und priorisierte Einstellung des Fehlerschutzes vorsieht.

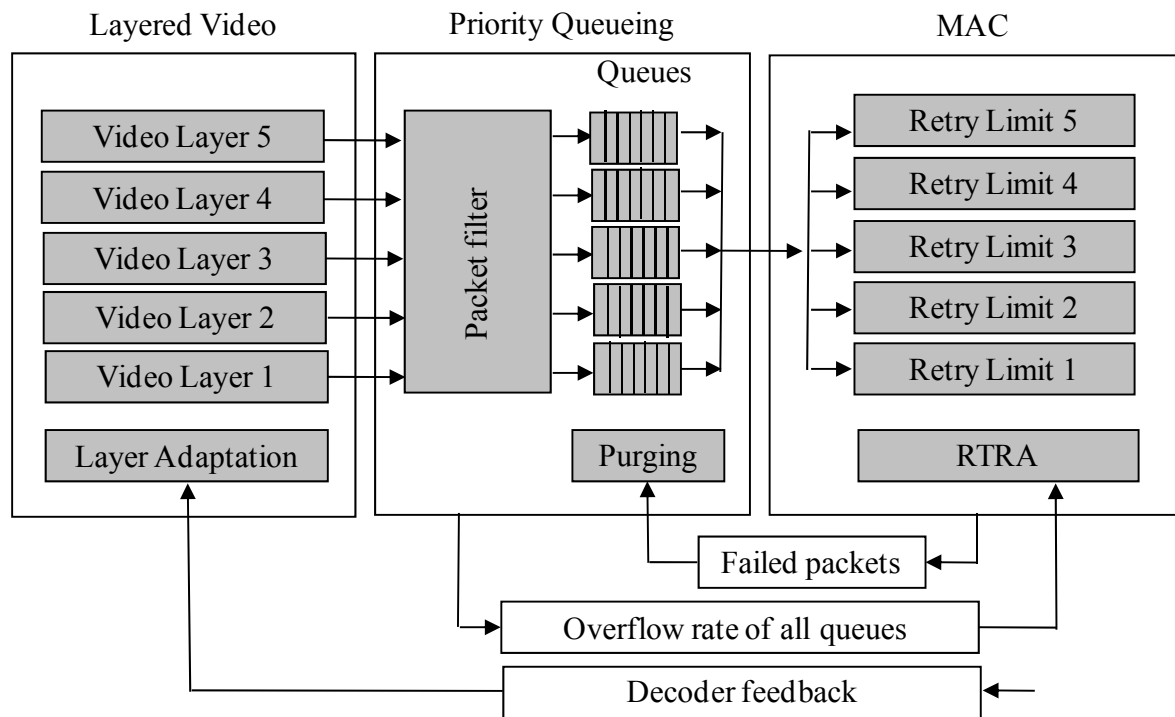


Abbildung 2.24: Architektur mit RTRA Verfahren nach [64]

### 2.5.5 Bewertung und Fazit

Für die weitere Konkretisierung und Bearbeitung ist es zunächst erforderlich, eine systematische qualitative Bewertung aller untersuchten Verfahren zum Stand der Wissenschaft und Technik durchzuführen. Hierfür werden als einheitliche Vergleichskriterien die im Abschnitt 2.2.4.1 verwendeten Kriterien zur Klassifikation drahtloser lokaler Netze verwendet. Entsprechend den dort beschriebenen Klassifikationsansatz werden für jedes Kriterium zwei verschiedene Varianten abgeleitet. Das Ergebnis der qualitativen Bewertung ist in der Tabelle 2-5 dargestellt.

Kriterium		Ende-zu-Ende	Multipfad-Routing	Mehrklassige priorisierte Übertragung
Kanal-eigenschaften	Indoor	-	+	+
	Outdoor	+	+	+
Netztopologie	Single-hop	+	-	++

	Multi-hop	-	++	+
<b>Anzahl der Knoten</b>	Niedrig	O	-	++
	Hoch	O	++	+
<b>Mobilität der Knoten</b>	Niedrig	+	+	++
	Hoch	-	++	+
Erfüllungsgrad: ++ sehr gut geeignet, + geeignet, O neutral, - nicht geeignet				

Tabelle 2-5: Bewertung verschiedener Architekturansätze

Zur Diskussion der erreichten Ergebnisse lassen sich folgende Aussagen formulieren:

**Kanaleigenschaften:** Verschiedene Kanalarten unterscheiden sich in erster Linie durch die Variabilität einzelner Parameter. Prinzipiell profitieren die Cross-Layer Verfahren gegenüber den Ende-zu-Ende Verfahren von ihren besseren Fähigkeiten der Adaptivität. Reine Ende-zu-Ende Verfahren erscheinen daher für die hochvariablen Indoor-Kanäle als besonders ungeeignet. Zwischen den Cross-Layer Ansätzen sind hinsichtlich der Kanaleigenschaften keine großen Unterschiede zu erkennen.

**Netztopologie:** Hier ergeben sich zwischen den einzelnen Cross-Layer Ansätzen wesentliche Unterschiede. Multipfad Routing Ansätze sind für single-hop Topologien gänzlich ungeeignet, wogegen eine mehrklassige priorisierende Übertragung sehr gut geeignet ist.

**Anzahl der Knoten:** Auch hier sind Unterschiede der Eignung der verschiedenen Cross-Layer Ansätze zu beobachten. Besonders geeignet sind Multipfad Routing Ansätze bei einer sehr hohen Knotenanzahl, wogegen bei mehrklassiger priorisierender Übertragung die Gesamtkomplexität des Netzes sehr stark zunimmt. Diese sind daher bei einer niedrigeren Knotenanzahl besser geeignet.

**Mobilität der Knoten:** Hierbei ist das Verhältnis ähnlich wie bei der Anzahl der Knoten. Bei hoher Mobilität sind vor allem die Multipfad Routing Ansätze geeignet.

Generell ist aus der durchgeführten Klassifikation und Bewertung zu erkennen, dass eine optimale Architektur für alle Klassen von Anwendungen nicht zu erreichen ist. Von daher ist es erforderlich, eine Architektur anhand der abzudeckenden Netzwerksszenarien auszuwählen. In Bezug auf die im Kapitel 1 aufgezeigten Anwendungen erscheinen Architekturen auf Basis einer mehrklassigen priorisierenden Übertragung als am besten geeignet für die Übertragung der skalierbar codierten Videodaten. Das ist vor allem daraus zu schließen, dass in den betrachteten Szenarien keine ausreichende Knotenanzahl und Mobilität zu erwarten ist, die einen nutzbringenden Einsatz von Multipfad Routing Verfahren erlauben würde. In den betrachteten Szenarien können vor allem die Verfahren auf Basis der mehrklassigen priorisierten Übertragung Vorteile aufweisen, da sie sich insbesondere für wenige Knoten mit wenig oder keiner Bewegung besonders eignen. Von daher werden diese Verfahren im weiteren Verlauf der Arbeit detaillierter berücksichtigt und im nächsten Schritt in einem Architekturentwurf umgesetzt.

## 2.6 Zusammenfassung und Fazit

Die skalierbare Videocodierung bietet gegenüber der klassischen nichtskalierbaren Videocodierung eine Reihe von Vorteilen: Neben einer hohen Flexibilität des Einsatzes bietet insbesondere die qualitätsskalierbare Codierung die Möglichkeit, eine Anpassung der erreichbaren Videoqualität an die Netzqualität vorzunehmen und somit eine sehr robuste Videoübertragung zu erzielen. Bisher lag der wichtigste Nachteil der skalierbaren Videocodierung in der mangelnden Codiereffizienz skalierbarer Codierv Verfahren. Dieser Nachteil kann durch heutige moderne Codierstandards wie H.264 kompensiert werden, so dass zum aktuellen Zeitpunkt die technologischen Voraussetzungen für eine technische Verbreitung der skalierbaren Videocodierung gegeben sind.

Drahtlose Netze stellen aufgrund der speziellen physikalischen Eigenschaften der drahtlosen Übertragung sowie aus der Tatsache der Bewegung der Knoten eine hohe Herausforderung für die robuste Übertragung von Videodaten dar. Es stehen jedoch verschiedene grundlegende Ansätze zur Verbesserung der Robustheit bei der Übertragung zur Verfügung. Zum aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik existieren bereits Verfahren, die durch Kombination der Grundlagenverfahren versuchen, eine Verbesserung der Robustheit bei der Übertragung skalierbar codierter Videodaten zu erreichen. Auf Basis der grundlegenden Arten von existierenden Verfahren: Ende-zu-Ende, Multipfad-Routing und die mehrklassige priorisierte Übertragung, kann durch eine systematische qualitative Bewertung herausgearbeitet werden, dass für die beabsichtigten Netzwerkszenarien der Ansatz einer mehrklassigen priorisierten Übertragung am

geeignetsten ist. Von daher wird für den Entwurf eines neuen robusten Verfahrens im weiteren Verlauf der Arbeit auf diesen Architekturansatz gesetzt. Hierfür ist es zunächst erforderlich, einen Architekturansatz zu definieren und quantitativ zu analysieren, welches Maß an Robustheit mit bestehenden Verfahren bereits erreichbar ist.



## **3 Analysen für eine adaptive Fehlerschutzeinstellung**

### **3.1 Einleitung**

Im vorangegangenen Kapitel wurde auf Basis einer umfassenden Anforderungsanalyse eine Klassifizierung und Bewertung des Standes der Technik hinsichtlich der Eignung für die angestrebten Netzszenarien durchgeführt. Dabei wurde sowohl der Bedarf einer Übertragung mit verschiedenen Prioritäten als auch der Sicherstellung einer hohen Robustheit für die Daten der höchsten Priorität abgeleitet. Diese Robustheit soll durch eine selbstoptimierende adaptive Einstellung des Fehlerschutzes erreicht werden. Um hierfür jedoch eines geeigneten neuen Verfahrens im Detail zu spezifizieren, sind zunächst einige Vorarbeiten und Analysen erforderlich.

Zum einen muss eine Referenzarchitektur spezifiziert werden, in die sich ein neues Verfahren integrieren lässt. Diese Referenzarchitektur ist auf Basis der bisher durchgeführten analytischen Bewertungen auszuwählen und im Detail zu beschreiben. Zum anderen muss man anhand der Referenzarchitektur relevante Fehlerschutzverfahren im Detail untersuchen, um genauere Aussagen über die notwendigen Verbesserungen zu erhalten die ein neues Verfahren erreichen muss. Für die Referenzarchitektur wird entsprechend der in den Abschnitten 2.3 und 2.5.5 aufgestellten Anforderungen und durchgeführten Bewertungen zur Eignung verschiedener Architekturansätze ein Lösungsansatz gewählt, der auf einer mehrklassigen priorisierten Übertragung verschiedener Videobitströme basiert. Diese Entscheidung beruht auf den dort erhaltenen Bewertungsergebnissen für die fokussierten Netzszenarien. Bei der Spezifikation der Referenzarchitektur wird, soweit möglich, in einem breiten Bereich auf existierende Standards und Techniken zurückgegriffen. Das ermöglicht eine Anbindung an heute existierende Standards der skalierbaren Videocodierung und der drahtlosen lokalen Vernetzung und sichert so auch eine schnelle Umsetzung des Verfahrens in die Praxis. Die Schwerpunkte der Analysen anhand der Referenzarchitektur stellen folgende Aspekte dar:

**Einordnung eines selbstoptimierenden adaptiven Fehlerschutzes.** In dem spezifizierten Lösungsansatz der Referenzarchitektur wird die Einbeziehung eines selbstoptimierenden adaptiven Fehlerschutzes vorgesehen, der eine hohe Robustheit für die Übertragung skalierbar codierter Videodaten erreichen kann.

**Untersuchungen zur Realisierung der mehrklassigen priorisierten Übertragung.** Bei dem vorgestellten Lösungsansatz der Referenzarchitektur wird davon ausgegangen, dass die skalierbaren Videodaten in mehreren Datenströmen mit verschiedener Priorität behandelt werden. Dabei wird die Fragestellung einer geeigneten Umsetzung im Detail untersucht und bewertet wobei zwei Architekturvarianten des Scheduling der verschiedenen priorisierten Datenströme verglichen werden.

Im zweiten Teil des vorliegenden Kapitels werden auf Basis der spezifizierten Architektur und bekannter Verfahren zum Stand der Technik vertiefte Detailanalysen zur Umsetzung des adaptiven Fehlerschutzes durchgeführt. Durch die dabei erreichten Ergebnisse wird der Bedarf für ein neues adaptives Einstellverfahren für einen ARQ-basierten Fehlerschutz aufgezeigt, da bisherige Verfahren die gestellten Anforderungen nachweislich nicht erfüllen können.

## **3.2 Referenzarchitektur auf Basis mehrklassiger priorisierter Übertragung**

### **3.2.1 Konzeption einer Referenzarchitektur**

Die gesamte Kette für die Übertragung skalierbar codierter Videodaten ist in der Abbildung 3.1 dargestellt. Sie besteht aus den Komponenten Videoencoder und Videodecoder sowie den Netzwerkschnittstellen für die drahtlose Übertragung der Daten. Der Videoencoder hat die Aufgabe, eine Original-Videsequenz in mehrere Bitströme (Base Layer und mehrere Enhancement Layer) zu codieren. Die Bitströme werden einer Netzchnittstelle übergeben und entsprechend ihrer Priorität einer Klasse zugeordnet. Die Aufgabe der Netzchnittstelle auf der Senderseite ist die Übertragung der Netzwerkclassen anhand dieser Priorisierung. Das drahtlose Netzwerk ist das Transportmedium. Auf der Seite des Empfängers werden die empfangenen Daten wieder in die zugehörigen Klassen eingeordnet und der Videodecodierung zugeführt. Dabei wird vor dem eigentlichen Decoder ein Puffer in die Übertragungskette eingesetzt, der zeitliche Schwankungen bei

der Übertragung kompensiert. Der Videodecoder erstellt aus den empfangenen Bitströmen eine Videosequenz für die Anzeige.

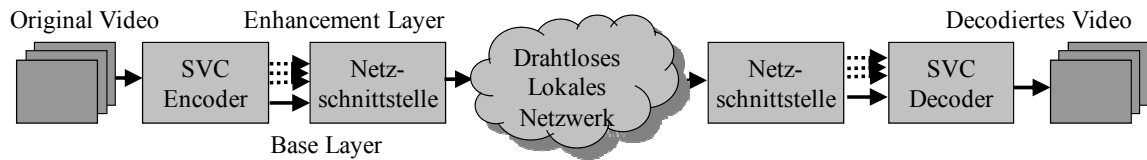


Abbildung 3.1: Übertragungskette für skalierbar codierte Videodaten

Für die Realisierung der aufgezeigten Übertragungskette benötigt man die Spezifikation einer Architektur, die den Anforderungen an die Übertragung skalierbar codierter Videodaten gerecht wird und es erlaubt, neue Verfahren zur Erhöhung der Robustheit der Übertragung zu integrieren. Ausgehend von den in Abschnitt 2.2 beschriebenen Grundlagen und der in Abschnitt 2.5.5 durchgeführten Bewertung verschiedener Architekturansätze lassen sich folgende Aspekte für den Entwurf einer neuen Architektur formulieren:

**Adaptivität.** Die Architektur muss in der Lage sein, adaptiv auf sich ändernde Eigenschaften der drahtlosen Übertragungsstrecke zu reagieren. Dabei ist das zeitliche Verhalten der physikalischen Übertragung in drahtlosen Netzen zu berücksichtigen. Die Detektion von Änderungen sollte dabei so dicht wie möglich an der Übertragungsstrecke erfolgen, da so mit kurzer Verzögerung darauf reagiert werden kann. Reine Ende-zu-Ende Verfahren identifizieren Änderungen der Übertragung nur zwischen Sender und Empfänger. Von daher können sie diese Anforderung nicht erfüllen und werden für den Architekturentwurf ausgeschlossen.

**Netzwerkszenarien.** Aus den Netzwerkszenarien sind Aussagen über die Anzahl der bei einer Übertragung involvierten Netzknoten sowie deren Beweglichkeit ableitbar. Dabei kann man feststellen, dass in den Szenarien eine eher geringe Anzahl an Netzknoten in die Übertragung involviert ist. Die Übertragung kann in vielen Fällen direkt zwischen Sender und Empfänger oder unter Einbeziehung eines zusätzlichen Netzknotens erfolgen. Eine große Anzahl an Knoten und Übertragungen über mehrere Netzknoten hinweg sind nicht zu erwarten. Da die Verfahren auf der Basis von Multipfad-Routing ihre Vorteile nur bei einer geeigneten Mindestanzahl an Netzknoten besitzen, zum Beispiel nur dann, wenn sich auch mehrere disjunkte Netzpfade aufbauen lassen, können diese Verfahren für den Architekturentwurf ebenfalls ausgeschlossen werden.

**Prioritäten.** Da die Granularität der Skalierbarkeit der Videoqualität mit steigender Zahl der Layer zunimmt muss die Architektur mehrere Prioritäten bei der Übertragung zulassen. Verfahren auf der Basis von Multipfad-Routing können nur so viele Prioritäten umsetzen, wie sich disjunkte Pfade bilden lassen. Die Skalierbarkeit der Prioritäten bei der Übertragung spricht für einen Architekturansatz auf Basis mehrerer Übertragungsklassen.

Unter Berücksichtigung der vorangegangenen Betrachtungen wurde für die im Rahmen der Arbeit spezifizierte Übertragungsarchitektur ein Lösungsansatz auf Basis einer mehrklassigen priorisierten Übertragung ausgewählt. Dabei werden die verschiedenen Layer-Bitströme der skalierbaren Codierung eigenen Übertragungsklassen mit spezifischer Priorität zugeordnet. Für die Zuordnung der Prioritäten zwischen verschiedenen Ebenen wird eine Cross-Layer Signalisierung eingeführt. Die Abbildung 3.2 gibt einen Gesamtüberblick über die im Rahmen dieser Arbeit spezifizierte Architektur für die Übertragung skalierbar codierter Videodaten in drahtlosen lokalen Netzen mit einer Einordnung der verschiedenen Teilkomponenten in die Schichten des ISO/OSI Modells. Es erfolgt weiterhin eine Zuordnung der Teilkomponenten auf die Video- und die Netzebene entsprechend der Definition der Videoübertragungsarchitektur in Abschnitt 2.2.2 .

Die in der Abbildung 3.2 orange hinterlegten Teilkomponenten stellen den Kern der vorliegenden Arbeit dar wobei sich der vorgeschlagene Lösungsansatz gegenüber anderen wie folgt abgrenzt:

- **Mehrklassige priorisierte Übertragung** Die Bitströme der einzelnen Videolayer werden in verschiedenen Prioritätsklassen übertragen. Die Priorisierung wird durch einen Scheduling Algorithmus vorgenommen. Es wird vorgeschlagen, das Scheduling in Kombination mit dem MAC-Verfahren auszuführen. Die Spezifikation dieses Lösungsansatzes sowie eine Abgrenzung zu anderen Lösungsvarianten erfolgt im Abschnitt 3.2.4.
- **Selbstoptimierender adaptiver Fehlerschutz** Da das primäre Ziel in der Schaffung einer robusten Videoübertragung liegt, wird die Integration eines selbstoptimierenden adaptiven Fehlerschutzes vorgeschlagen. Bei der Auswahl des Fehlerschutzverfahrens wird auf eine mögliche Realisierung durch Standardverfahren Wert gelegt. Eine Beschreibung sowie detaillierte Analyse zum selbstoptimierenden adaptiven Fehlerschutz erfolgt in den Abschnitten 3.2.5 sowie 3.3.

Für die mehrklassige Übertragung auf der Netzebene ist es erforderlich, auf der Videoebene einige Anpassungen vorzunehmen. Hierzu zählen die Extraktion der Bitströme aus dem Multiplex Bitstrom des Videoencoders (senderseitig), die Pufferung der Bitströme (empfängerseitig) sowie die Realisierung einer Cross-Layer Signalisierung. Die Anpassungen sind in der Abbildung 3.2 gelb gekennzeichnet. Die vorgestellte Architektur wurde zur Durchführung der Analysen und Bewertungen in einer Simulationsumgebung implementiert. Diese setzt sich zusammen aus einer Videoübertragungskette bestehend aus Referenzdaten, der H.264 SVC Videocodierung, der Paketierung der Bitströme und einer Puffersimulation. Eingebettet in die Videoübertragungskette ist eine Simulation des drahtlosen lokalen Netzwerkes. Eine detaillierte Dokumentation der Implementierung befindet sich im Anhang A.3.

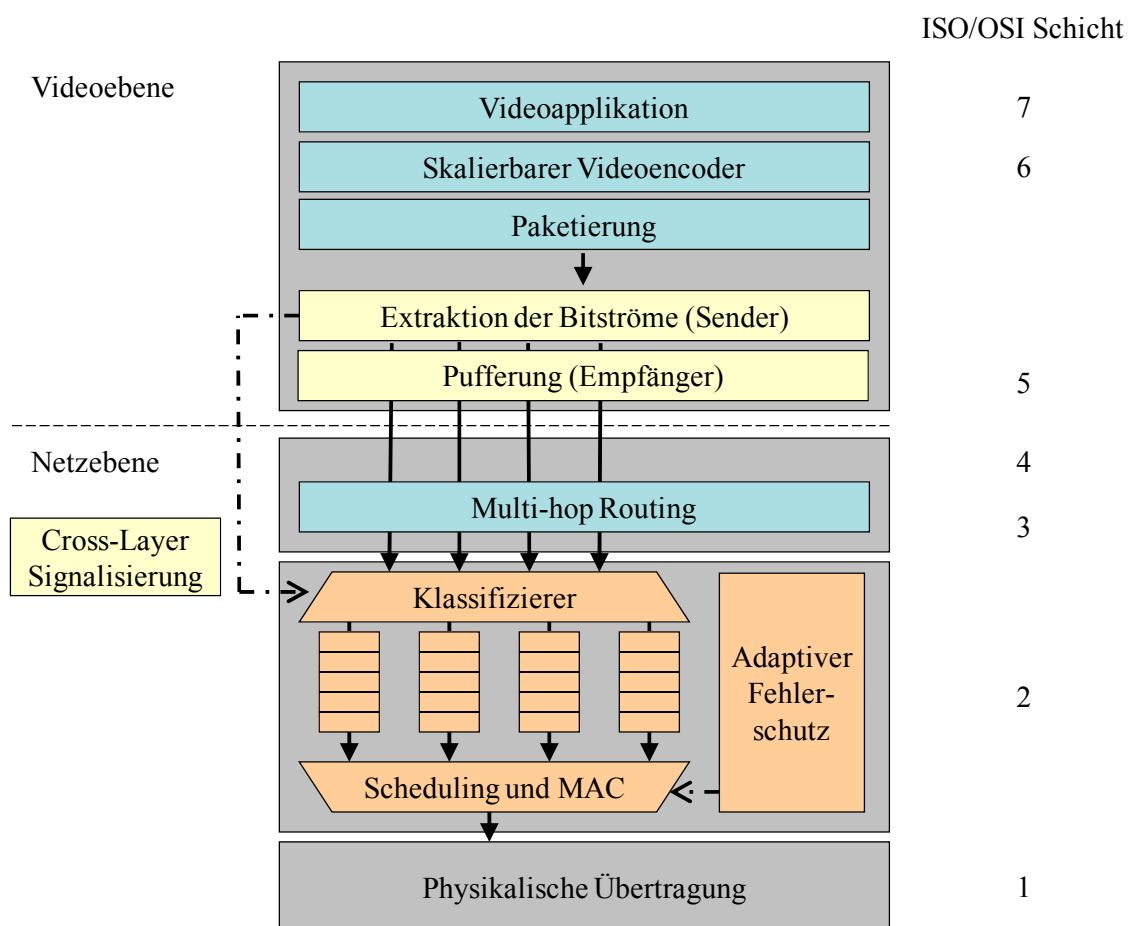


Abbildung 3.2: Gesamtkonzept und Einordnung des Architekturentwurfs

### 3.2.2 Teilkomponenten der Videoebene

Videoencoder und -decoder werden gemäß der Standardisierung der ITU-T befindlichen Spezifikation für H.264 SVC verwendet [88] [89]. An den Verfahren der Videocodierung werden keine Anpassungen vorgenommen. Da der Schwerpunkt der Arbeit nicht auf der Untersuchung der skalierbaren Videocodierung selbst sondern auf deren Übertragung liegt, wird von einer konstanten Anzahl verfügbarer Videolayer ausgegangen. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden durchgängig 4 Layer verwendet, da so eine standardbasierte Realisierung auf Basis von IEEE 802.11e möglich ist. Während die Videocodierung selbst unverändert bleibt, sind bei der Netzwerkanpassung Erweiterungen erforderlich, um eine mehrklassige priorisierte Übertragung zu ermöglichen. Im Einzelnen sind dies:

- **Paketierung und Extraktion der Bitströme.** Die Erzeugung eines paketbasierten Bitstromes wird im Network Adaptation Layer (NAL) des H.264 Standards spezifiziert. Für den nichtskalierbaren Bitstrom des H.264 AVC legt der RFC 3984 [127] die Paketierung als RTP-Pakete fest. Für den skalierbaren Bitstrom des SVC gibt es zum aktuellen Zeitpunkt noch keine verabschiedete Spezifikation. In [128] wird eine Organisation des Bitstromes für eine Multiplexübertragung aller Videolayer vorgeschlagen. Diese kann für den in der Arbeit vorgeschlagenen Ansatz einer mehrklassigen priorisierten Übertragung nicht verwendet werden, da es erforderlich ist, die verschiedenen Layer in einzelnen RTP-Strömen zu übertragen. Um die erforderliche Aufteilung der Layer vorzunehmen wird auf Basis der Implementierung des H.264 SVC [89] durch eine zusätzlich eingeführte Teilkomponente eine Extraktion der einzelnen Layer-Bitströme aus dem Multiplex-Bitstrom durchgeführt. Die Layer-Bitströme werden als einzelne RTP-Pakete ausgegeben.
- **Realisierung einer Cross-Layer Signalisierung.** Da die mehrklassige priorisierte Übertragung auf den unteren Schichten des ISO/OSI-Modells erfolgt, ist es erforderlich, eine Cross-Layer Signalisierung zu definieren. Dabei muss der Sender die Priorität der einzelnen Videolayer bei der Paketierung im Paket oder Frame kennzeichnen. Am Beispiel von IEEE 802.11e kann eine Kennzeichnung des Übertragungsrahmens durch das Eintragen einer TXOP-Priorität umgesetzt werden.
- **Einfügen eines Decoderpuffers auf der Empfängerseite.** Da bei der Übertragung über das drahtlose Netz Schwankungen der Übertragungsverzögerung (Jitter)

auftreten, ist es erforderlich, vor Beginn der Decodierung einen Decoderpuffer vorzusehen. Der Puffer besitzt als Parameter eine vorzugebende Pufferverzögerung. Diese gibt an, wie lange nach Eintreffen des ersten Paketes mit der Decodierung der Videobitströme gewartet werden muss. Da der Decoderpuffer eine kontinuierliche Decodierung gewährleisten soll, ist eine ausreichend hohe Pufferverzögerung vorzusehen. Optional kann die Pufferverzögerung auch durch ein Füllstandskriterium des Puffers bestimmt werden. Dabei wird vorgegeben, dass mit der Decodierung erst zu beginnen ist, wenn der Puffer einen bestimmten Füllstand (z.B. 20 %) erreicht hat. Bei der Pufferung müssen die verschiedenen Videolayer berücksichtigt werden.

### **3.2.3 Multi-hop Routing**

Für eine single-hop Übertragung zwischen zwei drahtlosen Geräten im Netz ist der Einsatz eines Routingprotokolls nicht erforderlich. Da jedoch auch multi-hop Netzwerkszenarien abgedeckt werden sollen, muss in der Übertragungsarchitektur ein multi-hop Routing Protokoll einbezogen werden. Da sich in den Voruntersuchungen des vorangegangenen Kapitels herausgestellt hat, dass für die betrachteten Netzszenarien eine Übertragung auf Basis mehrerer Prioritäten zielführender ist als eine Einbeziehung verschiedener Routen, ist der Schwerpunkt nicht in dem Entwurf eines neuen Routingprotokolls zu sehen. Deshalb wird der Einsatz eines bereits existierenden Protokolls vorgesehen. Für die drahtlose Ad-hoc Vernetzung stehen aus der Literatur verschiedene Ansätze zur Verfügung [82]. Für diese Arbeit wurde das AODV-Protokoll (Ad-hoc On-demand Distance Vector Routing) ausgewählt [45].

### **3.2.4 Spezifikation der mehrklassigen priorisierten Übertragung**

Die Umsetzung der mehrklassigen priorisierten Übertragung skalierbar codierter Videodaten erfolgt in den Netzschnittstellen. Von daher besitzen diese im Gesamtansatz eine besondere Bedeutung. Der Abschnitt beschreibt die Aufgaben der Netzschnittstellen zur Umsetzung der gestellten Anforderungen und grenzt den gewählten Ansatz gegenüber anderen Lösungsvarianten ab. Weiterhin wird die Realisierung der Netzschnittstellen durch ein standardbasiertes WLAN nach IEEE 802.11 beschrieben.

### 3.2.4.1 Aufgaben der Netzschnittstellen

Ausgehend von den im Abschnitt 2.3 definierten Anforderungen an die Übertragung skalierbar codierter Videodaten lassen sich folgende Aufgaben für die Netzschnittstellen ableiten:

- **Klassifizierung der Prioritäten.** Die Netzschnittstellen müssen in der Lage sein, die auf Basis der Cross-Layer Signalisierung bereitgestellten Prioritätsinformationen der einzelnen Bitströme auszuwerten und zu interpretieren.
- **Priorisierung des Ressourcenzugriffs.** Die Netzschnittstellen müssen einen priorisierten Zugriff auf das Übertragungsmedium gewährleisten.
- **Realisierung des Fehlerschutzes.** Die zu übertragenden Bitströme müssen entsprechend ihrer Priorität mit einem adäquaten Fehlerschutz versehen werden.
- **Adaptive Anpassung der Parametrierung.** Die Netzschnittstellen müssen ihre Parametrierung anhand der aktuell vorliegenden Eigenschaften der drahtlosen Übertragung anpassen können.

### 3.2.4.2 Netzschnittstelle mit Priorisierung auf der MAC Ebene

Für die Realisierung der priorisierten Ressourcenzuteilung wird eine Architektur basierend auf mehreren Warteschlangen ausgewählt. Jeder Prioritätsklasse wird dabei eine Warteschlange zugeordnet. Ein Klassifizierer nimmt die Pakete zuerst entgegen und ordnet sie dann entsprechend ihrer Priorität einer Warteschlange zu. Die höchste Priorität besitzt die Prioritätsklasse 0. Durch einen Scheduler wird entschieden, aus welcher Klasse die nächste Übertragung stattfindet. In der vorgeschlagenen Übertragungsarchitektur wird ein in die MAC-Schicht integriertes verteiltes Scheduling vorgesehen, wie es in der Abbildung 3.3 dargestellt ist.

Die der Netzschnittstelle übergebenen Pakete werden durch einen Klassifizierer verschiedenen Prioritätsklassen zugeordnet. Die Zuordnung erfolgt auf der im Abschnitt 3.2.2 vorgeschlagenen Cross-Layer Signalisierung. Für jede Priorität werden die Pakete in einer eigenen Warteschlange zwischengespeichert. Die Bedienung der Warteschlangen erfolgt in Kombination mit dem eingesetzten MAC-Verfahren. Wenn Pakete zur Übertragung anstehen, wird durch das MAC-Verfahren ermittelt, ob und wann eine Übertragung stattfinden kann. Ist die Übertragung eines Paketes möglich, wird das aktuellste Paket der höchsten Priorität ausgewählt. Der Erfolg einer Übertragung wird



durch den Empfang einer Acknowledge-Nachricht (ACK) vom Sender quittiert. Bei nicht erfolgreicher Übertragung stellt das MAC-Verfahren die Pakete entsprechend einem Backoff-Algorithmus zurück, d.h. sie verbleiben in der jeweiligen Warteschlange. Die Backoff-Algorithmen der einzelnen Klassen müssen dabei entsprechend ihrer Priorisierung unterschiedlich erfolgen.

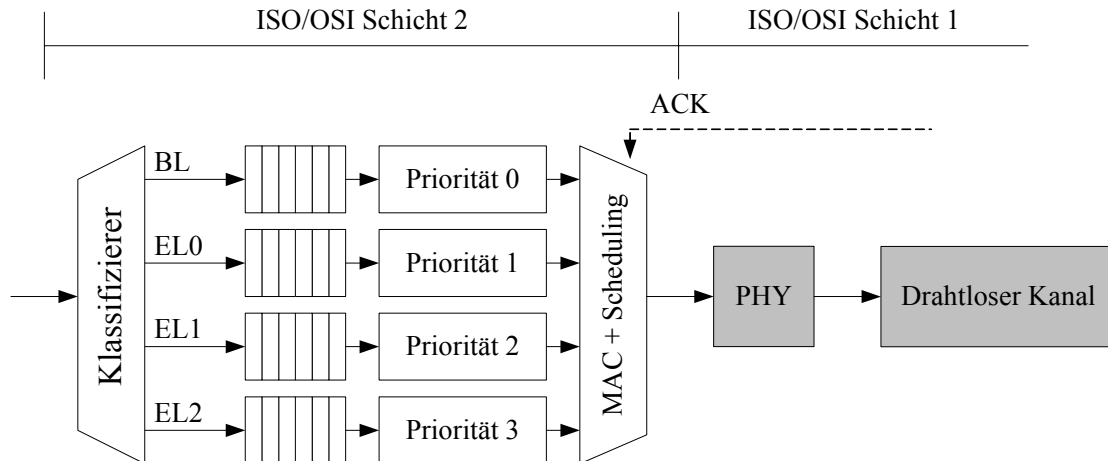


Abbildung 3.3: Architektur der Netzschnittstelle mit Scheduling im MAC

### 3.2.4.3 Realisierbarkeit der Netzschnittstelle im Standard IEEE 802.11e

Der ausgewählte Ansatz bietet sich sehr gut für eine Realisierung auf Basis des Standards IEEE 802.11e EDCA [35] an. In dem Standard lässt sich die Priorisierung der einzelnen Access Categories (AC) durch die Festlegung verschiedener MAC-Parameter umsetzen. Jede Prioritätsklasse wird dabei entsprechend Tabelle 3-1 genau einer Access Category zugeordnet.

Jede Access Category enthält eine für sie parametrisierte Zugriffsfunktion. In der Formel 4-1 ist die bei IEEE 802.11e EDCA verwendete Berechnung der Zugriffszeit dargestellt. Diese Zeit muss für die Übertragung eines Paketes einer bestimmten Prioritätsklasse  $i$  gewartet werden, bevor ein Senderversuch unternommen wird. Ebenfalls in der Formel integriert ist der exponentielle Backoff-Mechanismus des MAC-Protokolls. So ändert sich die Zeit durch Vergrößerung des Wartefensters (Contention Window) bei jedem neuen Senderversuch  $j$ . Die Berechnung des Wartefensters wird durch die Formeln 3-1 bis 3-3 definiert. Eine ausführliche Beschreibung der Formeln befindet sich im Anhang A.1.

$$t_{B_{j,i}} = t_S + n_{A_i} \cdot t_{Slot} + rand(0, CW_{j,i}) \cdot t_{Slot} \quad (3-1)$$

$$CW_{0,i} = CW_{\min_i} \quad (3-2)$$

$$CW_{j,i} = \min(CW_{\max_i}, 2 \cdot CW_{j-1,i} + 1) \quad (3-3)$$

Die Zeit  $t_s$  (Short Interframe Space) und die Slotzeit  $t_{Slot}$  sind fest durch die Standardisierung vorgegeben und gelten für alle Prioritätsklassen. Eine Prioritätssteuerung wird durch die Einstellung der Parameter  $n_{A_i}$ ,  $CW_{\min_i}$  und  $CW_{\max_i}$  ermöglicht. In der Standardisierung werden hierfür Werte vorgegeben, wie sie in der Tabelle 3-1 dargestellt sind. Neben der Parametrierung des Medienzugriffs werden in IEEE 802.11e zusätzlich die Parameter TXOP Limit und Retry Limit. Das TXOP Limit gibt an wie lange eine Station in einer Prioritätsklasse senden darf, wenn sie einen Medienzugriff erreicht hat. Das Retry Limit gibt die maximale Anzahl der Sendeversuche für einen Rahmen an.

Prioritäts- klasse	Access Category	$n_{A_i}$	$CW_{\min_i}$	$CW_{\max_i}$	TXOP Limit [s]	Retry Limit
0	AC3	2	7	15	0.003264	7
1	AC2	2	15	31	0.006016	7
2	AC1	3	31	1023	0	7
3	AC0	7	31	1023	0	7

Tabelle 3-1: Parametrierung nach IEEE 802.11e

Die angegebene Standardparametrierung ist für die Unterstützung der verschiedenen Dienstklassen Sprache, Video und Daten ausgelegt. Für spezielle Anwendungszwecke ist eine Anpassung der Parameter möglich. So muss die Realisierung bestimmter Schedulingstrategien bei diesem Ansatz durch geeignete Einstellung der MAC Parameter erfolgen. In der Literatur sind hierzu Ansätze für die Realisierung eines Priority Queueings (PQ) oder eines Weighted Fair Queueings (WFQ) [61] [62].

#### 3.2.4.4 PQ Scheduler oberhalb der MAC Schicht

Ein alternativer Ansatz ist die Verwendung eines PQ Schedulers oberhalb der MAC-Schicht. Dieser ist in der Abbildung 3.4 dargestellt. Die Realisierung des priorisierten

Ressourcenzugriffs wird hierbei lokal in einer Station geregelt und ist in der ISO/OSI Schicht 3 angesiedelt. Der Scheduler wählt das nächste zu übertragende Paket aus und übergibt es der MAC-Instanz in der ISO/OSI Schicht 2. Die Priorisierung erfolgt durch Auswahl einer geeigneten Scheduling Strategie.

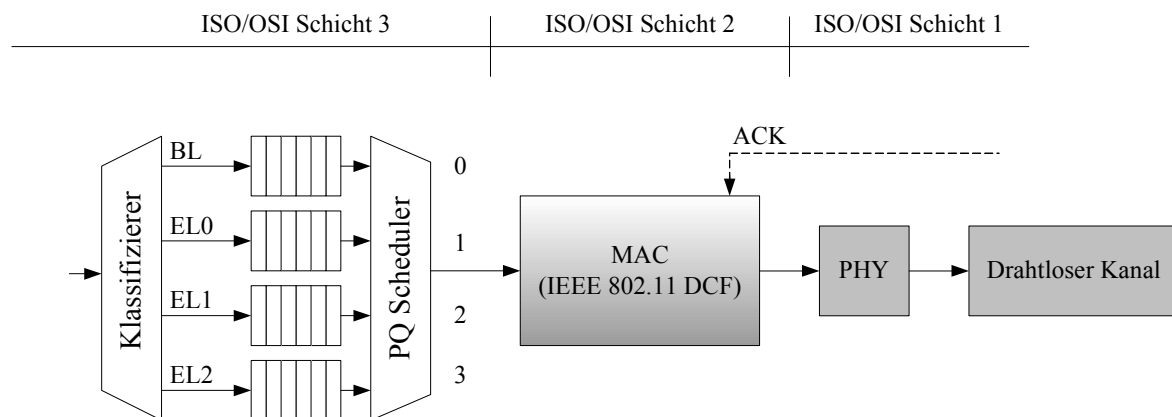


Abbildung 3.4: Architektur der Netzschnittstelle mit PQ Scheduler

Die Auswahl der Schedulingstrategie kann beliebig erfolgen, da der Scheduler in der Regel durch Software implementiert werden kann. Als geeignet zeigt sich eine Priority Queueing Strategie (PQ) [53] [54]. Hierbei wird ein Paket in einer bestimmten Prioritätsklasse nur dann ausgewählt, wenn die Warteschlangen mit höheren Prioritäten leer sind. Bei der Umsetzung dieses Ansatzes im Wireless LAN kann das MAC-Verfahren nach IEEE 802.11 verwendet werden. Dieser Architekturansatz kommt bei dem RTRA-Verfahren zum Einsatz [64].

### 3.2.4.5 Bewertung der Lösungsvarianten und Begründung der Auswahl

Prinzipiell eignen sich beide Lösungsvarianten für die Realisierung einer mehrklassigen priorisierten Ressourcenzuteilung. Allerdings ergeben sich mehrere grundlegende Unterschiede. Ein wichtiger Unterschied liegt im Backoff-Verhalten der beiden Ansätze. Bei dem PQ Scheduler steht nur ein Backoff-Mechanismus für alle Klassen zur Verfügung. Dieser muss sequenziell genutzt werden. Bei dem Scheduling auf der MAC-Ebene besitzt jede Klasse einen eigenen Backoff-Mechanismus, das heißt alle Klassen werden parallel behandelt. Hierdurch ergibt sich ein Performancegewinn von bis zu 20%. Dies konnte durch eine im Rahmen der Arbeit durchgeführte simulative Untersuchung nachgewiesen werden. Dabei wurde das Durchsatzverhalten der beiden Architekturen am Beispiel von IEEE 802.11b verglichen. Für das PQ Scheduling wurde ein Priority Queueing Verfahren,

für das MAC-Scheduling die Standardparametrierung nach Tabelle 3-1 verwendet. Das Ergebnis der erreichbaren Datendurchsätze ist in der Abbildung 3.5 dargestellt.

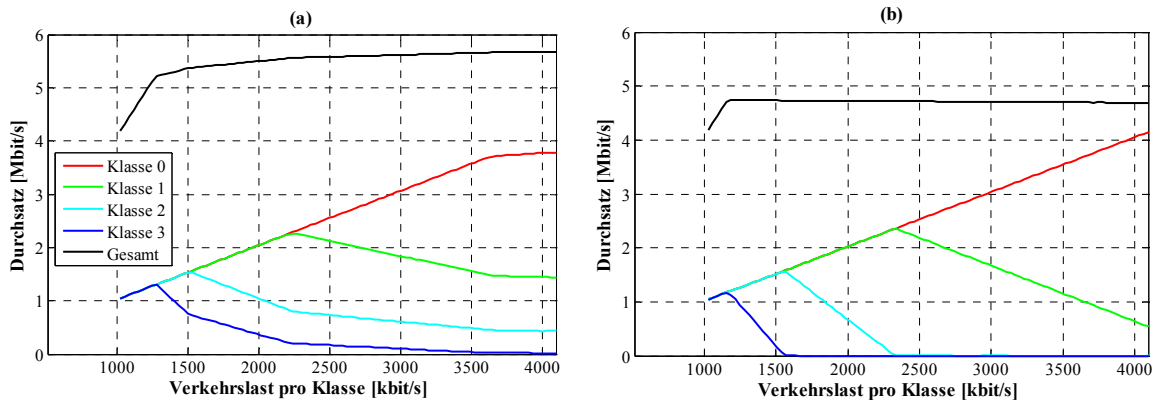


Abbildung 3.5: Durchsatzvergleich (a: MAC Scheduler, b: PQ Scheduler)

Dargestellt sind der erreichbare Gesamtdurchsatz sowie das Verhalten in den einzelnen Übertragungsklassen. Es ist ersichtlich, dass der Gesamtdurchsatz beim Scheduling im MAC-Verfahren (ca. 5,8 Mbit/s) deutlich über dem des PQ Schedulers (ca. 4,8 Mbit/s) liegt. Auch beim Verhalten in den einzelnen Klassen ergeben sich Unterschiede. Hier ist der PQ Scheduler besser in der Lage, eine strikte Aufteilung der Übertragungsressourcen zu gewährleisten. Beim MAC Scheduler ist im Vergleich eine Annäherung der verschiedenen Klassen zu beobachten, wobei die niedrigpriorien Klassen auf Kosten der höherpriorien bevorzugt werden. Dies führt dazu, dass bei sehr hohen Lasten die Klasse mit der höchsten Priorität einen besseren Durchsatz erreicht als beim MAC-Scheduling. Allerdings besteht die Möglichkeit, durch Auswahl anderer MAC-Parameter dieses Verhalten zu beeinflussen [61] [62]. Im Gegensatz zum PQ Scheduler, der nur innerhalb einer Station arbeitet, wird das Scheduling auf der MAC-Ebene verteilt im drahtlosen Netzwerk durchgeführt. Damit ist durch diesen Ansatz auch bei der parallelen Verwendung mehrerer Geräte eine netzwerkweite Durchsetzung der Prioritäten bis zum Zugriff auf das Übertragungsmedium möglich. Bei Einsatz des PQ Schedulers in einer Station besteht die Möglichkeit, dass eine Station mit höherpriorien Datenverkehr durch eine Station mit niedripriorien Verkehr beeinträchtigt wird.

#### 3.2.4.6 Fazit zur Realisierung des priorisierten Ressourcenzugriffs

In der Tabelle 3-2 werden die Ergebnisse für die Bewertung der untersuchten Varianten für die Realisierung des Scheduling zusammengefasst.

Kriterium	MAC Scheduler	PQ Scheduler
Robustheit Base Layer	+	+
Gesamtperformance	+	+
Netzweite Priorisierung	+	-
Erfüllungsgrad: + geeignet, 0 neutral, - nicht geeignet		

Tabelle 3-2: Zusammenfassender Vergleich der Architekturvarianten

Obwohl beide Architekturen sich für die Steuerung eines mehrklassigen priorisierten Ressourcenzugriffes eignen, ergeben sich bei der Leistungsfähigkeit und der netzweiten Durchsetzung von Prioritäten Unterschiede. Der Ansatz des Scheduling im MAC-Verfahren bringt einen Leistungsgewinn mit sich und ermöglicht darüber hinaus eine netzweite Berücksichtigung der Prioritäten. Aufgrund dieser beiden Aspekte kann der bei der Konzeption gewählte Ansatz für die Realisierung einer mehrklassigen priorisierten Übertragung bestätigt werden.

### 3.2.5 Einführung einer selbstoptimierenden adaptiven Fehlerschutzeinstellung

Die Einstellung des Fehlerschutzes muss so erfolgen, dass die im Abschnitt 2.3 aufgestellten Anforderungen für die Übertragung skalierbar codierter Videodaten erfüllt werden können. Besondere Bedeutung kommt dabei der robusten Übertragung des Base Layers zu, da hierdurch die Basisqualität der skalierbaren Videoübertragung abgesichert wird. Wie in der Einleitung und Zielsetzung der Arbeit im Abschnitt 1.3 beschrieben, wird als Basisverfahren für die Realisierung des Fehlerschutzes das ARQ-Protokoll (Automatic Repeat-reQuest) verwendet. Dieses Verfahren zeichnet sich durch seine einfache Implementierbarkeit aus und ist in bestehenden Standards, wie IEEE 802.11, bereits verfügbar.

Der begrenzende Einstellparameter des ARQ-Protokolls ist das Retry Limit. In den bestehenden Standards wird er, wie in der Tabelle 3-1 dargestellt, mit einer festen Anzahl vorgegeben, das heißt, es wird keine adaptive Fehlerschutzeinstellung vorgesehen. In dieser Arbeit wird dieser Ansatz um eine adaptive Einstellung des Retry Limits erweitert.

Dadurch wird die Stärke des Fehlerschutzes anpassbar und die Netzschnittstelle kann so auf sich ändernde Kanaleigenschaften reagieren. Für die Bestimmung des optimalen Retry Limits ist eine selbstoptimierende Arbeitsweise der Netzschnittstelle erforderlich.

Die Einordnung des ARQ-Protokolls und des selbstoptimierenden adaptiven Einstellverfahrens wird, wie in der Abbildung 3.2 dargestellt, in der Referenzarchitektur auf Netzebene in der ISO/OSI-Schicht 2 vorgesehen. Hierfür sind folgende Argumente anzuführen:

- **Hohe Adaptivität.** Durch die Einordnung können sehr schnelle Reaktionszeiten (ACK/NAK Pakete) erreicht werden, da die ARQ-Kommunikation nur zwischen den jeweils benachbarten Knoten erfolgt.
- **Unterstützung Multi-hop.** Insbesondere kann dadurch die multi-hop Übertragung besser unterstützt werden, da Datenpakete nicht Ende-zu-Ende neu übertragen werden müssen, sondern die Fehlerbehandlung im Netz stattfinden kann.
- **Standardnahe Realisierung.** Das ARQ-Verfahren wird bereits in Standards für die lokale drahtlose Vernetzung auf der Schicht unterstützt. Damit ist eine standardnahe Implementierung möglich.

Um eine robuste Übertragung für die Videoebene zu gewährleisten, muss das Einstellverfahren selbstoptimierend arbeiten. Wie im Abschnitt 2.4.2 beschrieben, besteht hinsichtlich der erreichbaren robusten Videoqualität ein direkter Zusammenhang zur Paketfehlerrate bei der Übertragung. Somit ergibt sich das Ziel der Optimierung in der Einstellung eines Retry Limits bei dem eine Minimierung der Paketfehlerrate erreicht werden kann. Diese Optimierung erfolgt dabei, wie in der Abbildung 3.6 dargestellt, in jedem einzelnen Netzknoten einer Verbindung.

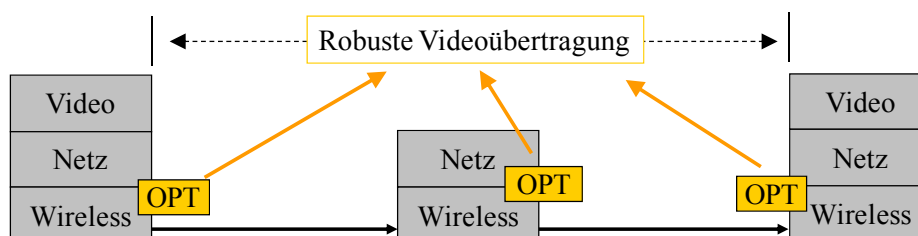


Abbildung 3.6: Selbstoptimierende Arbeitsweise der Netzschnittstellen

Durch die Optimierung der einzelnen Paketfehlerraten wird ein insgesamt optimales Verhalten der resultierenden Ende-zu-Ende Paketfehlerrate und damit eine optimierte Videoqualität erwartet. Zudem ergibt sich durch den Ansatz die Möglichkeit einer leichtgewichtigen und standardkonformen Implementierbarkeit.

### **3.2.6 Zusammenfassung und Fazit**

Der vorliegende Abschnitt beschreibt den Entwurf einer Referenzarchitektur für die Übertragung skalierbar codierter Videodaten in drahtlosen lokalen Netzen. Die Referenzarchitektur dient dazu, Verfahren für die selbstoptimierende adaptive Fehlerschutzeinstellung in einem einheitlichen Rahmen und unter gleichen Randbedingungen zu analysieren und zu betrachten. Die Architektur basiert auf einer mehrklassigen priorisierten Übertragung der skalierbaren Videodaten, wodurch sie für die betrachteten Netzszenarien besonders geeignet ist. Ein spezieller weiterer Aspekt ist die Untersuchung eines geeigneten Scheduling-Verfahrens für die Umsetzung der priorisierten Übertragung. Hierbei konnte gezeigt werden, dass hinsichtlich der Leistungsfähigkeit und der netzweiten Durchsetzung ein Scheduling im MAC-Verfahren besonders geeignet ist.

## **3.3 Simulative Detailanalyse für eine adaptive Fehlerschutzeinstellung**

Ausgehend von dem im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Entwurf einer Referenzarchitektur wird in einem nächsten Schritt eine detaillierte simulative Analyse der selbstoptimierenden adaptiven Fehlerschutzeinstellung auf Basis existierender Referenzverfahren durchgeführt. Ziel dieser Analyse ist zum einen die quantitative Bewertung vergleichbarer Lösungsansätze und zum anderen die detaillierte Herausarbeitung bestehender Defizite. Diese Erkenntnisse fließen als Basis in den Entwurf eines neuen selbstoptimierenden adaptiven Einstellverfahrens für den Fehlerschutz ein. Es wird dabei zunächst das Verhalten der Verfahren auf der Netzebene bewertet und es werden empirisch Schlüsse für die Videoebene gezogen. Zur Durchführung der Bewertung wird ausgehend von den im Kapitel 2 bereits aufgestellten Anforderungen und Bewertungskriterien ein Bewertungsschema erstellt.

### **3.3.1 Auswahl relevanter Referenzverfahren**

Bei der Erfassung des Standes der Wissenschaft und Technik im Abschnitt 2.5 wurden bereits zwei Verfahren identifiziert, die als Referenzverfahren für die vorgeschlagene

Architektur in Betracht gezogen werden. Die Verfahren dienen dazu, detaillierte Erkenntnisse für eine selbstoptimierende adaptive Fehlerschutzeinstellung zu gewinnen. Weiterhin müssen Entwürfe neuer Verfahren einem Leistungsvergleich mit ihnen standhalten können. Die ausgewählten Verfahren sind das Standardverfahren nach IEEE 802.11e [35] und das RTRA Verfahren nach [64].

**Das Standardverfahren nach IEEE 802.11e** eignet sich sehr gut für die Realisierung der entworfenen Übertragungsarchitektur. Es deckt das MAC-basierte Scheduling komplett ab. Der Fehlerschutz wird durch das implizite Stop-and-Wait ARQ-Verfahren realisiert. Eine Adaption der Retry Limits ist im Standard nicht vorgesehen, so dass mit statischen Retry Limits gearbeitet werden muss. Für die Parametrierung der MAC-Funktion wird ebenfalls auf die im Standard vorgeschlagenen Werte zurückgegriffen (Siehe Tabelle 3-1). Das Verfahren nach IEEE 802.11e bietet eine sehr gute Basis für die Umsetzung der angestrebten Architektur und ist von daher als Referenzverfahren sehr relevant.

**Das RTRA Verfahren** basiert auf der in der Abbildung 3.4 dargestellten Architektur mit einem PQ Scheduler. Es wird eine klassifizierte Ressourcenzuteilung in Verbindung mit einem adaptiven priorisierten ARQ-Fehlerschutz kombiniert. Hierzu wird zwischen der Videoanwendung, dem Queueing und dem Fehlerschutz eine Cross-Layer Signalisierung spezifiziert. Im Rahmen des RTRA Verfahrens werden keine spezifischen MAC und PHY Schichten spezifiziert, so dass für einen Vergleich die Verwendung des IEEE 802.11 Standards herangezogen wird. Das RTRA Verfahren ist das einzige bekannte Verfahren für eine mehrklassige priorisierte Übertragung skalierbar codierter Videodaten mit einem adaptiven ARQ-Fehlerschutz.

### 3.3.2 Methodik und Kriterien für eine Detailanalyse

Für die Bewertung der Referenzverfahren auf der Netzebene wird auf Basis von Simulationen das Verhalten der resultierenden Paketfehlerraten (PER) der einzelnen Übertragungsklassen unter verschiedenen Betriebssituationen erfasst und empirisch ausgewertet. Als sich ändernde Randbedingungen für den Betrieb werden das Fehlerverhalten und das Lastverhalten angenommen.

**Das Fehlerverhalten** charakterisiert die Änderung der resultierenden Paketfehlerraten bei sich ändernder Bitfehlerrate des drahtlosen Kanals. Die variierende Bitfehlerrate wird auf Basis des verwendeten Kanalmodells über eine Variation der Sender-Empfänger Distanz bei einzelnen Tests erreicht.



**Das Lastverhalten** charakterisiert die Änderung der resultierenden Paketfehlerraten bei einer sich ändernden Verkehrslast in den einzelnen Prioritätsklassen. Als Verkehrslast wird hierbei eine konstante Datenrate angenommen, die symmetrisch in allen Klassen vorliegt.

Bei beiden Verfahren wurden auf Basis der im Anhang A.3 beschriebenen Simulationsumgebung implementiert. Der Simulation wurde ein WLAN nach IEEE 802.11b zugrunde liegt, da dieser Standard ein robustes Übertragungsverfahren im WLAN beinhaltet. Bei der Parametrierung der Simulationsmodelle werden einheitliche Randbedingungen definiert. Die wichtigsten der eingestellten Parameter sind in der Tabelle 3-3 aufgelistet. Die Analysen werden zunächst unter teilweise idealisierten Bedingungen durchgeführt, um die charakteristischen Verhaltensweisen besser herauszuarbeiten und Fremdeinflüsse zu vermeiden. So werden nur zwei Knoten mit einer single-hop Verbindung betrachtet. Das Auftreten von Kollisionen kann dadurch ausgeschlossen werden. Als drahtloses Ausbreitungsmodell wird ein Shadowing Modell nach der Formel A-6 mit den in Tabelle 3-3 angegebenen Parametern verwendet. Die gewählte Einstellung entspricht der Abbildung eines Indoor-Szenarios.

Parameter	Wert
WLAN PHY Standard	IEEE 802.11b
PHY Bitrate	11 Mbit/s
Kanalmodell	Shadowing indoor
Path Loss Parameter $\beta$	3,7
Varianz $\sigma$	4,0
Anzahl der Knoten	2
Anzahl der Verbindungen	1
Länge der Warteschlangen	50 Pakete

Tabelle 3-3: Parametrierung für die Detailanalysen

### 3.3.3 Analyseergebnisse des Standardverfahrens nach IEEE 802.11e

Die Ergebnisse der Analyse des Standardverfahrens nach IEEE 802.11e zeigt die Abbildung 3.7. Beim Fehlerverhalten ist eine Korrelation des Verhaltens der Paketfehlerraten zu beobachten. Dies ist plausibel, da für alle Klassen die gleiche statische Fehlerschutzeinstellung verwendet wird. Das bedeutet jedoch, dass die Skalierung der Klassen untereinander durch eine solche statische Einstellung nicht ausreichend gegeben ist. Auch die Robustheit des Base Layers, der in der höchstpriorien Klasse übertragen werden muss, kann nicht wesentlich herausgestellt werden. Beim Lastverhalten ist eine klare Differenzierung der einzelnen Prioritätsklassen erkennbar. Auch kann hier über den untersuchten Bereich die Robustheit des Base Layers identifiziert werden.

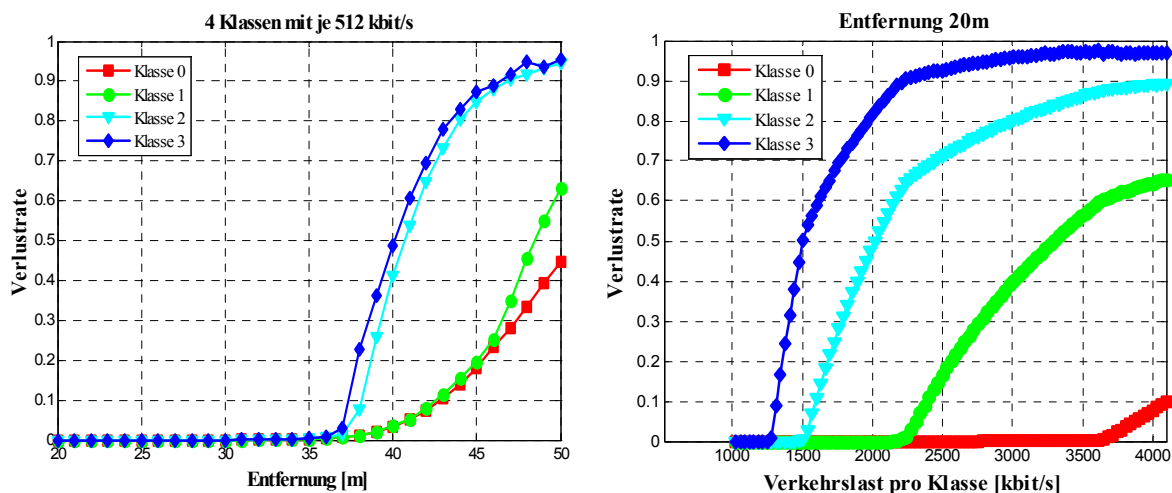


Abbildung 3.7: Ergebnisse des (a) Fehler- und (b) Lastverhaltens für IEEE 802.11e

### 3.3.4 Analyseergebnisse des RTRA Verfahrens

Die Ergebnisse der Analyse des RTRA-Verfahrens sind in der Abbildung 3.8 dargestellt. Im Unterschied zum Standardverfahren ist hier beim Fehlerverhalten eine Verbesserung der Differenzierung der einzelnen Prioritätsklassen erkennbar. Beim Lastverhalten ist eine Verschlechterung gegenüber dem Standardverfahren zu beobachten, wobei vor allem die Beeinträchtigung der Robustheit der höchstpriorien Klasse über einen breiten Bereich auffällig ist. Dies bedeutet für die Videoanwendung ein Auftreten von Verlusten im Base Layer bereits bei relativ geringen Lasten.

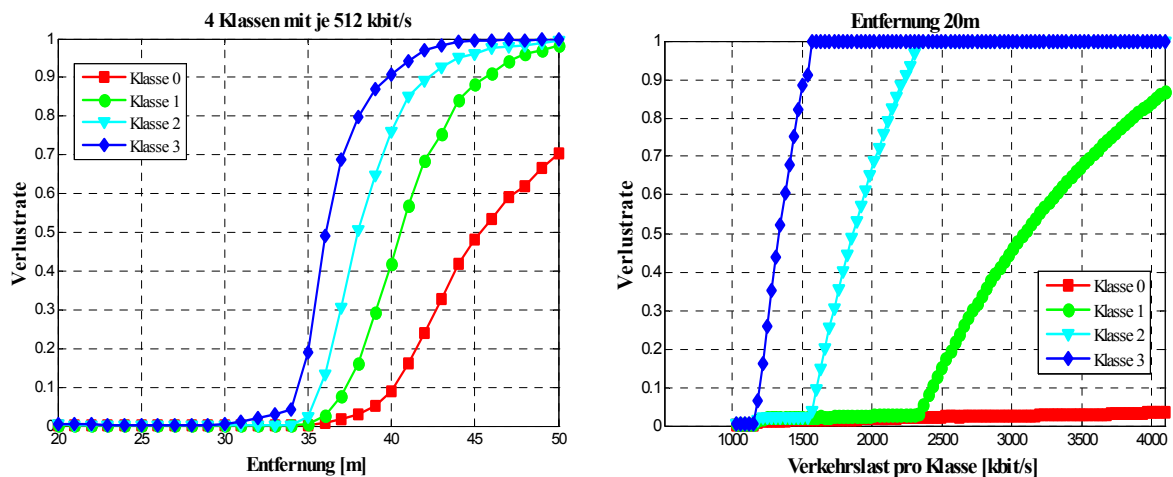


Abbildung 3.8: Ergebnisse des (a) Fehler- und (b) Lastverhaltens für RTRA

### 3.3.5 Bewertung der Analyseergebnisse

Um die Verwendbarkeit der durchgeführten Analysen zur Formulierung gültiger Aussagen abzusichern, ist es erforderlich, die Aussagekraft der Analyseergebnisse zu bewerten. Hierfür können, wie bereits im Abschnitt 2.4.2 beschrieben, die Konfidenzintervalle der erfassten Paketfehlerraten herangezogen werden. Diese geben an, in welchem Bereich um den statistischen Mittelwert der exakte Wert der erfassten Paketfehlerrate liegt. Je kleiner ein Konfidenzintervall ist, desto genauer ist die durchgeführte Messung oder Simulation. Im Folgenden wird an ausgewählten Stützstellen der erfolgten Simulation eine Bewertung auf dieser Basis durchgeführt. Zur Berechnung der Konfidenzintervalle werden dabei die Formeln 3-12 und 3-13 verwendet. Dabei wurde eine statistische Sicherheit von 95% angesetzt, das heißt, es kann zu 95% davon ausgegangen werden, dass die exakte Paketfehlerwahrscheinlichkeit auch in dem ermittelten Konfidenzintervall liegt. Weiterhin wurde eine Simulationsdauer von 500s verwendet, wodurch sich eine Anzahl der ermittelten Einzelwerte von  $n=500$  ergibt. Die Tabelle 3-4 und die Tabelle 3-5 zeigen die dabei erreichten Ergebnisse am Beispiel der Simulation für IEEE 802.11e.

Entfernung [m]	Last pro Klasse[kbit/s]	$\bar{P}_{PER}$	$P_{PER_{gu}}$	$P_{PER_{go}}$	$\Delta P_{PER}$
30	512	0,0	0,0	0,0	0,0
		0,0	0,0	0,0	0,0
		0,0	0,0	0,0	0,0

		0,0	0,0	0,0	0,0
40	512	0,033	0,031	0,035	0,004
		0,035	0,033	0,037	0,004
		0,412	0,398	0,425	0,027
		0,487	0,473	0,5	0,027
50	512	0,448	0,442	0,453	0,011
		0,633	0,627	0,638	0,011
		0,944	0,929	0,959	0,03
		0,954	0,939	0,969	0,03

Tabelle 3-4: Konfidenzintervalle der Simulation des Fehlerverhaltens für IEEE 802.11e

Entfernung [m]	Last pro Klasse[kbit/s]	$\bar{P}_{PER}$	$P_{PER_{gu}}$	$P_{PER_{go}}$	$\Delta P_{PER}$
20	2048	0,0	0,0	0,0	0,0
		0,0	0,0	0,0	0,0
		0,523	0,520	0,526	0,006
		0,838	0,834	0,842	0,008
20	3072	0,0	0,0	0,0	0,0
		0,425	0,423	0,427	0,004
		0,810	0,806	0,813	0,007
		0,960	0,954	0,967	0,013
20	4096	0,098	0,095	0,101	0,006
		0,655	0,652	0,658	0,006
		0,893	0,889	0,896	0,007
		0,969	0,956	0,982	0,026

Tabelle 3-5: Konfidenzintervalle der Simulation des Lastverhaltens für IEEE 802.11e

Zur Auswertung ist die ermittelte Länge des jeweiligen Konfidenzintervalls  $\Delta P_{PER}$  mit Bezug auf den gesamten Wertebereich der Paketfehlerrate zu betrachten. Dabei ist eine Auswertung der Konfidenzintervalle nur für die Stützstellen möglich, bei denen auch Paketverluste ermittelt wurden. Die Ergebnisse der ermittelbaren Konfidenzintervalle liegen sowohl für das Fehlerverhalten als auch für das Lastverhalten in der Größenordnung von 0,4% bis 3% bezogen auf den gesamten Wertebereich der Paketfehlerrate von 0 bis 100%. Das heißt, im schlechtesten erfassten Fall ist eine maximale Abweichung des exakten Wertes vom simulativ erfassten Mittelwert  $\bar{P}_{PER}$  von 1,5% zu erwarten. Diese Genauigkeit der durchgeführten Simulationen ist dadurch ausreichend, so dass die simulativ erhaltenen Werte für Schlussfolgerungen herangezogen werden können. Vergleicht man die Größen der Konfidenzintervalle des Fehlerverhaltens und des Lastverhaltens, ist festzustellen, dass beim Lastverhalten bessere Werte erreicht werden, als beim Fehlerverhalten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass beim Lastverhalten eher die Statistik der Verkehrslast eine Rolle spielt, beim Fehlerverhalten eher die Statistik des verwendeten drahtlosen Kanalmodells. Da die Verkehrslast konstant ist, ergibt sich beim Lastverhalten eine relativ kleine Streuung der Paketfehlerraten, was damit zu kleineren Konfidenzintervallen führt. Beim Fehlerverhalten geht die Streuung des verwendeten statistischen Kanalmodells in die Streuung der Paketfehlerraten und damit in die Berechnung der Konfidenzintervalle stärker ein. Da das gleiche Simulationsmodell zugrunde liegt, ergibt sich für das RTRA-Verfahren ein ähnliches Verhalten der Ergebnisse, so dass eine eigene Auswertung an dieser Stelle nicht erfolgt.

### 3.3.6 Zusammenfassende Bewertung der Referenzverfahren

Die Gesamtbewertung der durchgeführten Detailanalysen wird in der Tabelle 3-6 zusammengefasst. Dabei wird die Erfüllung der aufgezeigten Kriterien, Robustheit Base Layer, Skalierung und Selbstoptimierung, qualitativ eingeschätzt. Das Kriterium einer robusten Übertragung des Base Layers kann von keinem der untersuchten Verfahren als durchgängig zufriedenstellend eingeschätzt werden. Dies gilt vor allem beim Fehlerverhalten. Hier verhält sich die Paketfehlerrate der Prioritätsklasse 0 (entspricht dem Base Layer) beim Standardverfahren nach IEEE 802.11e nicht wesentlich besser als die der anderen Klassen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Standard keine adaptive Fehlerschutzeinstellung vorsieht. Das RTRA Verfahren kann gegenüber dem Standardverfahren trotz der adaptiven Fehlerschutzeinstellung keine wesentliche Verbesserung bei der Robustheit erzielen, obwohl die Differenzierung der verschiedenen Prioritätsklassen hier deutlicher erkennbar ist als beim Standardverfahren. Beim Lastverhalten zeigen beide Verfahren bessere Eigenschaften als beim Fehlerverhalten, da

eine deutliche Differenzierung der einzelnen Prioritätsklassen zu erkennen ist. Das RTRA Verfahren zeigt eine geringe Instabilität der Robustheit des Base Layers, wobei auch hier die maximale Verlustrate unter 5% bleibt. Das Standardverfahren kann aufgrund des Schedulings die Robustheit nicht im gesamten untersuchten Lastbereich gewährleisten. Hier tritt eine Überlastsituation bereits bei ca. 3700 kbit/s Verkehrslast auf. Dadurch ergibt sich hinsichtlich der Last ein geringerer Einsatzbereich im Vergleich zum RTRA Verfahren, jedoch kann innerhalb des Bereiches eine bessere Robustheit gewährleistet werden.

Kriterium	IEEE 802.11e		RTRA	
	Fehler	Last	Fehler	Last
Robustheit Base Layer	-	O	-	O
Skalierung	-	+	O	+
Selbstoptimierung	Statisch		Selbstoptimierend	
Erfüllungsgrad: + geeignet, O neutral, - nicht geeignet				

Tabelle 3-6: Bewertung der Referenzverfahren

Insgesamt ist festzustellen, dass eine zufriedenstellende Umsetzung der angestrebten Übertragungsarchitektur für skalierbar codierte Videodaten nach Abbildung 3.2 mit den zur Verfügung stehenden Referenzverfahren nicht möglich ist. Durch die simulative Analyse kann der Bedarf für ein neues Verfahren für die selbstoptimierende adaptive Einstellung des Fehlerschutzes nachgewiesen werden. Dieses wird benötigt, um eine Verbesserung der Robustheit als auch der Servicedifferenzierung insbesondere im Fehlerverhalten zu erreichen.

### 3.4 Zusammenfassung und Fazit

In dem Kapitel wird eine Referenzarchitektur für die Übertragung skalierbar codierter Videodaten in drahtlosen lokalen Netzen auf Basis einer mehrklassigen Priorisierung

spezifiziert. Als neuer Ansatz wird der Einsatz einer selbstoptimierenden adaptiven Fehlerschutzeinstellung vorgeschlagen. Darüber hinaus werden Untersuchungen zur Eignung verschiedener Varianten des Scheduling diskutiert. Dabei wird eine standardkonforme Umsetzbarkeit auf Basis von IEEE 802.11 aufgezeigt.

Durch den Einsatz des MAC-basierten Scheduling kann eine netzweite priorisierte Übertragung der einzelnen Videolayer erreicht werden. Zusätzlich liefert die selbstoptimierende adaptive Fehlerschutzeinstellung auf Basis des ARQ-Protokolls einen Ansatz für die Erhöhung der Robustheit bei der Übertragung.

Durchgeführte Detailanalysen machen deutlich, dass eine durchgängige Erfüllung der gestellten Anforderungen hinsichtlich eines Fehler- und Lastverhaltens mit bestehenden Referenzverfahren zum Stand der Technik noch nicht erreicht werden kann. Insbesondere zeigt sich der Bedarf für eine verbesserte adaptive Einstellung des ARQ-basierten Fehlerschutzes. Dabei muss insbesondere zur Schaffung einer höheren Robustheit eine Verbesserung des Fehlerverhaltens erreicht werden.

Da der Bedarf an einem verbesserten Verfahren zur adaptiven Fehlerschutzeinstellung des ARQ-Verfahrens besteht, wird der weitere Fokus der Arbeit auf diesen Aspekt gelegt. Das Ziel ist, auf Basis weiterer Analysen zur Arbeitsweise der Fehlerschutzadaption ein Einstellverfahren zu definieren, das in der Lage ist, sowohl beim Fehler- als auch beim Lastverhalten die Anforderungen hinsichtlich der Übertragung skalierbar codierter Videodaten zu erfüllen und insbesondere beim Fehlerverhalten Verbesserungen herbeizuführen.





## **4 Vorschlag eines neuen Verfahrens zur adaptiven Fehlerschutzeinstellung**

### **4.1 Einleitung**

Das Kapitel beschreibt den Entwurf des neuen Verfahrens SORA (Self Optimizing Retry Adaptation) für die adaptive Einstellung des Fehlerschutzes im Rahmen einer mehrklassigen priorisierten Übertragung von skalierbar codierten Videodatenströmen. Wie in den Analysen im vorangegangenen Kapitel herausgearbeitet wurde, existiert zum aktuellen Stand der Technik kein Verfahren, das die Anforderungen beim Fehler- und beim Lastverhalten umfassend erfüllen kann. Das neue SORA-Verfahren dient zur Parametrierung des ARQ-Protokolls. Dieses besitzt für den Einsatz in drahtlosen lokalen Netzen und insbesondere im WLAN einen sehr hohen Stellenwert und arbeitet standardkonform. Von daher wird zunächst eine vertiefte Betrachtung und Analyse des ARQ-Protokolls und dessen Einsatz in drahtlosen lokalen Netzen durchgeführt. Da dieses Protokoll jedoch zunächst für eine mehrklassige priorisierte Übertragung nicht ausreichend ist, wird darauf aufbauend ein Verfahren entworfen, das einen ARQ-Fehlerschutz auch für diese Übertragung ermöglicht. Mit Hilfe des neuen Entwurfs kann gezeigt werden, dass eine Verbesserung des Fehler- und Lastverhaltens bei Verwendung einer einheitlichen klassenübergreifenden Einstellung erreicht werden kann. Da WLAN eine hohe Bedeutung für die drahtlose lokale Multimediaübertragung besitzt, wird beim Entwurf des neuen Verfahrens großer Wert auf eine Konformität mit den Standards IEEE 802.11 bzw. IEEE 802.11e gelegt.

## 4.2 Analyse und Modellbildung

### 4.2.1 Analyse des ARQ-Protokolls in drahtlosen lokalen Netzen

Da das neue SORA-Verfahren für die Einstellung des ARQ-Protokolls dienen soll, ist zunächst eine detaillierte Untersuchung des ARQ-Protokolls beim Einsatz in drahtlosen lokalen Netzen erforderlich. Obwohl in der Literatur bereits Untersuchungen im Bereich des Medienzugriffs existieren, beispielsweise in [12] [74] [99] [113] [137], konnten bisher keine Lösungsansätze unter Berücksichtigung von Übertragungsfehlern und der damit zusammenhängenden Wirkungsweise eines ARQ-Fehlerschutzes gefunden werden.

#### 4.2.1.1 Statistische Auswertung der Sendeversuche beim ARQ Protokoll

Eine wichtige Kennzahl für die Bewertung der Leistungsfähigkeit des ARQ-Protokolls und der resultierenden Übertragungsdauer ist die Anzahl  $J$  der für einen Datenrahmen benötigten Sendeversuche. Die Sendeversuche setzen sich zusammen aus dem initialen Senden eines neuen Datenrahmens und den Sendewiederholungen. Die Anzahl der Sendeversuche ist abhängig von der Fehlerrate des Übertragungskanals  $P_e$  und wird begrenzt durch das eingestellte Retry Limit  $L_r$ . Während die Fehlerrate  $P_e$  als gegeben betrachtet werden muss, kann über  $L_r$  eine begrenzende Einstellung des Fehlerschutzes vorgenommen werden. Die Wirksamkeit dieser Einstellung ist jedoch ebenfalls abhängig von der tatsächlich benötigten Anzahl der Wiederholungen  $J - 1$ . Von daher ist es zunächst erforderlich, Aussagen zu dieser Anzahl zu gewinnen. Da das Verhalten von  $P_e$  als stochastisch angenommen werden muss, ist keine deterministische Aussage für  $J$  möglich. Es muss eine statistische Auswertung vorgenommen werden. Hierfür wurde auf Basis einer simulierten Übertragung ein Histogramm für die Verteilung der benötigten Sendewiederholungen  $J - 1$  erfasst. Als Retry Limit wurde bei der Untersuchung  $L_r = 20$  angenommen. Die Ergebnisse für vier verschiedene Fehlersituationen sind in der Abbildung 4.1 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die statistische Verteilung in den verschiedenen Situationen stark voneinander unterscheidet. Bei einer geringen Entfernung sind sehr wenige Sendewiederholungen erforderlich, da eine geringe Fehlerrate vorliegt. In diesem Fall zeigt eine Einstellung des Retry Limits  $L_r$  keine Wirkung. Bei einer großen Entfernung mit entsprechend hoher Fehlerrate sind die Sendewiederholungen vergleichsweise gleichverteilt. Hier kommt die Einstellung von  $L_r$  sehr stark zur Wirkung.

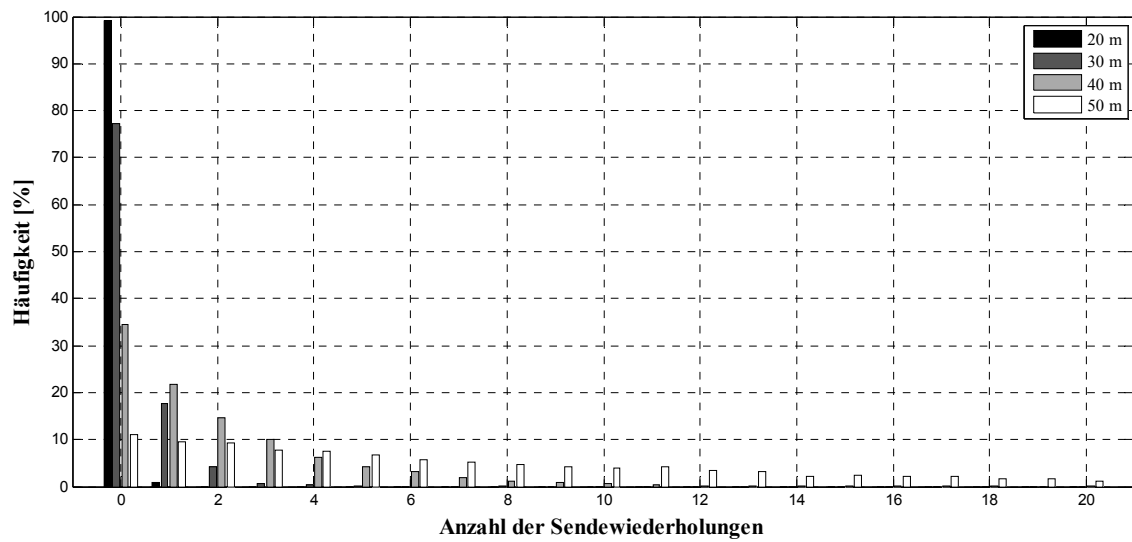
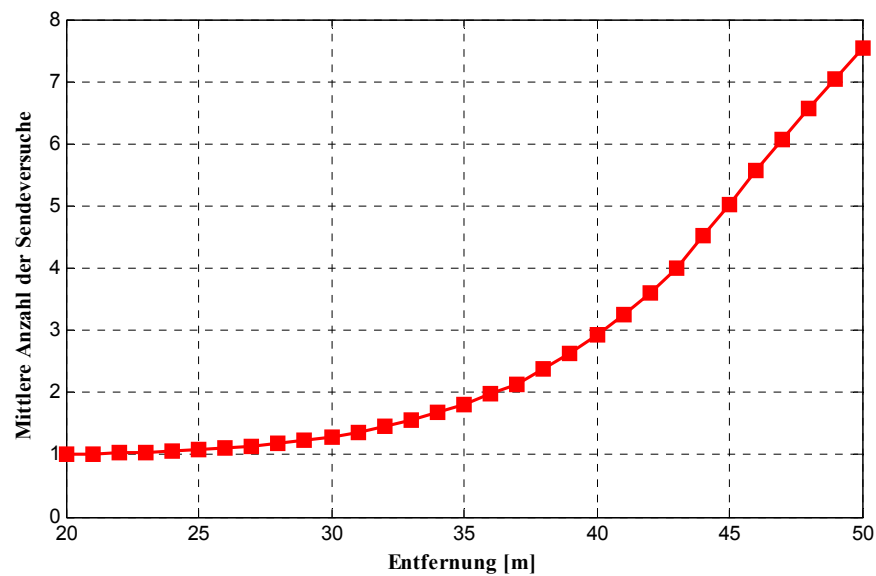


Abbildung 4.1: Statistische Verteilung der Sendewiederholungen

Abbildung 4.2: Mittlere Anzahl der benötigten Sendeversuche für  $L_r = 20$ 

Ein zusammenfassender statistischer Wert ist die mittlere Anzahl der benötigten Sendeversuche  $\bar{J}$ . Diese lässt sich aus der statistischen Auswertung unter Verwendung der Formel 4-1 berechnen, wobei  $n_j$  die Anzahl von Paketen mit  $j$  Sendewiederholungen aus einer Gesamtpaketmenge von  $n_{ges}$  Paketen beschreibt.

$$\bar{J} = 1 + \sum_{j=0}^{L_r} j \cdot \frac{n_j}{n_{ges}} \quad (4-1)$$

Das Verhalten von  $\bar{J}$  bei steigender Entfernung zwischen Sender und Empfänger ist in der Abbildung 4.2 dargestellt. Es zeigt sich ein nichtlineares Anwachsen der mittleren Anzahl an Sendewiederholungen, wobei Werte für  $\bar{J} > 2$  erst in oberen Hälfte des untersuchten Entfernungsbereiches erreicht werden. Hier kommt die Einstellung eines Retry Limits  $L_r$  zum Tragen. Daraus lässt sich schließen, dass im Großteil des untersuchten Anwendungsbereiches die Standardeinstellung  $L_r = 7$  für eine robuste Übertragung ausreichend ist. Nur in Bereichen steigender Übertragungsfehler, d.h. bei größeren Entfernungen kommt die adaptive Einstellung des Retry Limits zum Tragen.

#### 4.2.1.2 Zeitverhalten des ARQ-Protokolls

Die Anzahl der benötigten Sendeversuche für die einzelnen Rahmen bestimmt maßgeblich die Übertragungsverzögerung und somit das Zeitverhalten bei der drahtlosen Übertragung. Da bei der Übertragung von Videodaten immer eine gleichmäßige Verteilung der Übertragungsverzögerungen gefordert wird, ist eine Abschätzung und Untersuchung des Zeitverhaltens beim Einsatz des ARQ-Protokolls erforderlich, um dessen Eignung zu bewerten. Prinzipiell ergeben sich aus Sicht des Zeitverhaltens beim Einsatz von ARQ auf der Linkebene auf jeden Fall Vorteile gegenüber einer Verwendung von ARQ für die Ende-zu-Ende Übertragung. Sendewiederholungen sind hier sehr viel schneller und effizienter realisierbar. Dies gilt insbesondere für die multi-hop Übertragung, da Sendewiederholungen für jeden einzelnen Hop eingesetzt werden können und nicht über den gesamten Übertragungspfad. Wie in der Formel 4-2 gezeigt, setzt sich die Gesamtdauer einer Paketübertragung  $t_{p\bar{U}}$  zusammen aus der Verweildauer eines Paketes in der Warteschlange  $t_Q$  und der Sendedauer des korrespondierenden Rahmens  $t_{tx}$ .

$$t_{p\bar{U}} = t_Q + t_{tx} \quad (4-2)$$

Die Verweildauer in der Warteschlange wird durch die Anzahl der Pakete in der Warteschlange bestimmt. Die Sendedauer ist von dem physikalischen Übertragungsverfahren abhängig. Eine Aufstellung der Sendedauer für eine Übertragung im WLAN nach IEEE 802.11 ist im Anhang A.2 enthalten.

Die Verweildauer in der Warteschlange ist bei einer befüllten Warteschlange wesentlich grösser als die Sendedauer [99] [117]. Um eine Bewertung der Eignung von ARQ für die Videoübertragung im WLAN durchzuführen, wurde aus der simulativen Analyse des Abschnittes 4.2.1.1 die resultierende Übertragungsverzögerung ausgewertet. Das resultierende Ergebnis ist in der Abbildung 4.3 dargestellt.

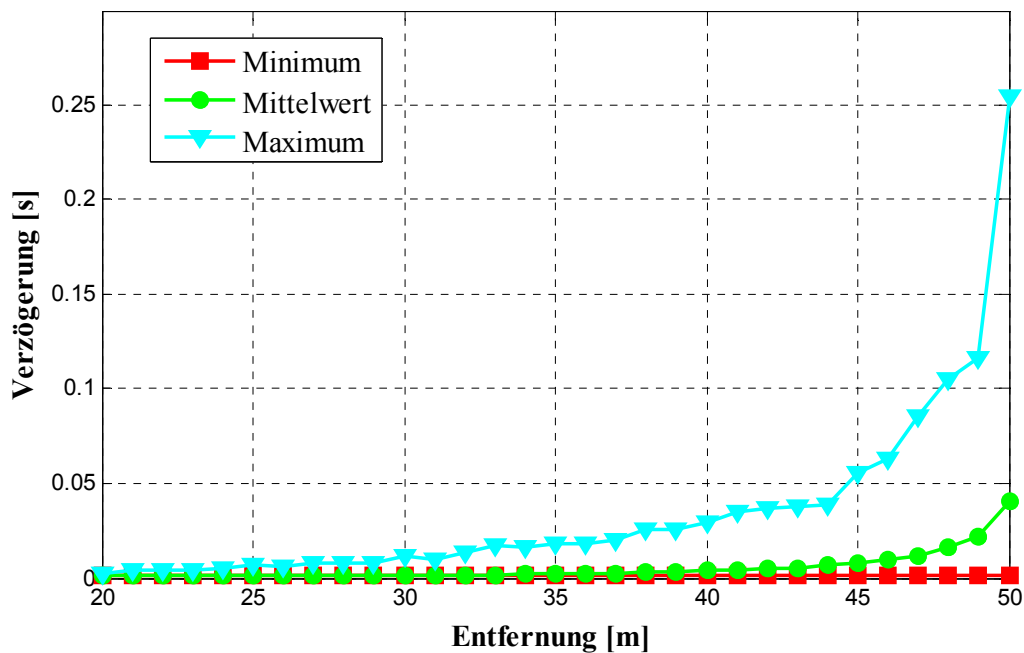


Abbildung 4.3: Verhalten der Übertragungsverzögerung

Bei der Auswertung wurden sowohl die aufgetretenen Minimal-, Durchschnitts- und Maximalverzögerungen erfasst. Es ist ersichtlich, dass im gesamten untersuchten Bereich eine durchschnittliche Verzögerung von  $< 50\text{ms}$  eingehalten werden kann. Allerdings nehmen bei steigender Entfernung die Maximalverzögerungen stark zu, da sehr viele Rahmen nur mit einer hohen Anzahl an Sendewiederholungen übertragen werden können.

#### 4.2.1.3 Fazit zum Einsatz des ARQ-Protokolls

Der Einsatz des Stop-and-Wait ARQ-Protokolls bietet für drahtlose lokale Netze eine einfache und in das Medienzugriffsverfahren integrierbare Realisierung eines Fehlerschutzprotokolls. Am Beispiel von WLAN kann gezeigt werden, dass die resultierenden Übertragungsverzögerungen durchaus für die Videoübertragung und insbesondere das Videostreaming akzeptabel sind. Eine echtzeitfähige Videoübertragung ist bei hohen Entfernungen zwischen Sender und Empfänger allerdings nicht mehr möglich. Da das Verfahren bei Kollisionen und Übertragungsfehlern gleichermaßen reagiert, ist

auch hier ein vergleichbares Verhalten zu erwarten, wie es für die Analysen zur Abhängigkeit von der Entfernung erfasst wurde. Das Retry Limit kann als Parameter für die Einstellung des Fehlerschutzes verwendet werden. Wie aus der Nutzung von Sendewiederholungen hervorgeht, kann mit einem adaptiven Retry-Limit besonders die Robustheit bei hohen Entfernungen verbessert werden, da mit steigenden Entfernungen der Bedarf an Sendewiederholungen drastisch zunimmt.

#### 4.2.2 Modellbildung für eine optimale Einstellung des Retry Limits

Bei der bisherigen Analyse des ARQ-Protokolls wurde zunächst idealisiert angenommen, dass jede Station einen unendlich großen Puffer für die Zwischenspeicherung der zu sendenden Datenrahmen hat. Damit treten in der Station keine Verluste durch Überlast auf. Bei der realen Implementierung ist jedoch davon auszugehen, dass die Speichermöglichkeiten in einer Station begrenzt sind. Tritt eine Überlast auf, gehen somit Datenrahmen verloren, ohne gesendet zu werden (Buffer Overflow). Um diese realen Bedingungen abzubilden, muss die Netzschnittstelle einer Station wie ein Warteschlangensystem modelliert werden. Hierfür existieren in der Literatur bereits theoretische Modellansätze [53] [64]. Das Modell ist in der Abbildung 4.4 dargestellt.

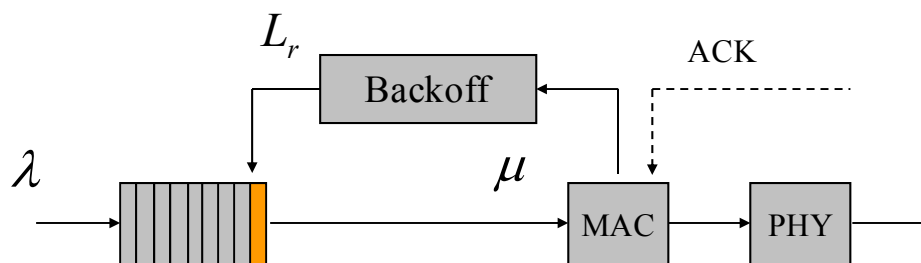


Abbildung 4.4: Modell einer Netzschnittstelle mit ARQ-Protokoll nach IEEE 802.11

Die Netzschnittstelle erhält Datenrahmen von einer übergeordneten Instanz im ISO/OSI Modell mit einer Empfangsrate  $\lambda$ . Für die Übertragung kann sie durch das MAC-Verfahren eine effektive Servicerate  $\mu$  zur Verfügung stellen. Bei Übertragungsverlusten oder Kollisionen verbleiben Datenrahmen zunächst in der Warteschlange, da die Station solange versucht, einen Rahmen zu übertragen, bis das Retry Limit  $L_r$  erreicht wird. Kann der Rahmen bei  $L_r$  Sendewiederholungen nicht übertragen werden, wird er verworfen. Aus diesem Verhalten ergibt sich eine Paketfehlerrate  $p_l$ , die sich unter Annahme eines

gedächtnislosen Übertragungskanal durch die Formel 4-3 beschreiben lässt. Dabei stellt  $P_e$  die Paketfehlerrate bei der physikalischen Übertragung dar.

$$p_l = P_e^{L_r+1} \quad (4-3)$$

Die Paketfehlerrate durch Überlauf lässt sich aus der Bilanz der Raten der Warteschlange ableiten. Unter Verwendung der Fluid Modellierung für Warteschlangen [53] [54] lässt sich die Beziehung nach der Formel 4-4 ansetzen.

$$p_b = \frac{\lambda - \mu}{\lambda} \quad (4-4)$$

Da in dieser grundlegenden Beziehung jedoch keine mehrfachen Sendeveruche vorgesehen sind, muss die Formel erweitert werden. Hierfür wird die mittlere Anzahl an benötigten Sendeveruchen  $\bar{J}$  verwendet. Um diese Anzahl vervielfacht sich im Durchschnitt die tatsächliche Empfangsrate, da jede Mehrfachübertragung wie ein neu empfangener Rahmen betrachtet werden kann. Entsprechend ergibt sich die Beschreibung der Paketfehlerrate durch Überlauf nach der Formel 4-5.

$$p_b = \frac{\lambda \cdot \bar{J} - \mu}{\lambda \cdot \bar{J}} \quad (4-5)$$

Zur Modellierung von  $\bar{J}$  schlägt [64] die Verwendung einer TAYLOR-Reihenentwicklung vor. Demnach lässt die mittlere Anzahl der benötigten Sendeveruche eines Rahmens mit der Formel 4-6 beschreiben. Setzt man 4-6 in 4-5 ein, ergibt sich für  $p_b$  eine Berechnung nach der Formel 4-7

$$\bar{J} = \frac{1 - P_e^{L_r+1}}{1 - P_e} \quad (4-6)$$

$$p_b = 1 - \frac{1}{\varphi(P_e)} \frac{1}{1 - P_e^{L_r+1}} \quad (4-7)$$

mit:

$$\varphi(P_e, \lambda, \mu) = \frac{\lambda}{\mu \cdot (1 - P_e)} \quad (4-8)$$

Unter der Annahme kleiner Fehlerraten lässt sich die Gesamtfehlerrate näherungsweise aus der Summe der beiden Teilfehlerraten ermitteln woraus sich Formel 4-9 ergibt.

$$p_{ges} \approx 1 - \frac{1}{\varphi} \left( \frac{1}{1 - P_e^{L_r+1}} \right) + P_e^{L_r+1} \quad (4-9)$$

Das Optimierungsziel lässt sich jetzt als eine minimale insgesamt Paketfehlerrate  $\min(p_{ges})$  formulieren. Hierfür ist die Extremwertaufgabe  $dp_{ges}/dL_r = 0$  zu lösen, woraus sich eine Lösungsformel zur Bestimmung von Extremas nach 4-10 ergibt.

$$-\frac{\ln P_e}{\varphi} \cdot \frac{P_e^{L_r+1}}{(1 - P_e^{L_r+1})^2} + \ln P_e \cdot P_e^{L_r+1} = 0 \quad (4-10)$$

Aus der Formel 4-10 lassen sich zwei verschiedene Extrempunkte bestimmen. Zum einen ergibt sich eine Lösung durch den Term  $P_e^{L_r+1}$ . Da für die Fehlerrate immer  $P_e < 1$  angenommen werden kann, lässt sich diese Lösung durch den Grenzübergang  $L_r \rightarrow \infty$  ermitteln. Das heißt, es ergibt sich hieraus  $L_{r_{opt}} = \infty$ . Eine weitere Lösung lässt sich durch Zusammenfassung und Umstellung der restlichen Gleichung bestimmen. Das Ergebnis ist die Formel 4-11.

$$L_{r_{opt}} = \log_{P_e} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{\varphi}} \right) - 1 \quad (4-11)$$

Um die Qualität und Verwendbarkeit des Modellansatzes und der gefundenen Optimallösungen zu bewerten, ist eine analytische und simulative Untersuchung erforderlich, die im folgenden Abschnitt beschrieben wird. Untersucht werden müssen dabei der Geltungsbereich des Modelles sowie die Arten der Extrema, da für eine optimale Lösung ein Minimum erforderlich ist.



## 4.2.3 Diskussion des Modellansatzes und der Optimierungslösungen

### 4.2.3.1 Geltungsbereich des Modells

Da das durch die Formel 4-9 abgebildete Modell eine Fehlerrate repräsentiert, ist es nur dann korrekt, wenn der Wertebereich des Modells im Bereich  $p_{ges} \in [0;1,0]$  liegt. Ausgehend davon lassen sich zwei Kriterien für die Gültigkeit des Modells ableiten:

- Minimalitätskriterium: Da die beiden Terme  $p_b$  und  $p_l$  des Modells ebenfalls Fehlerraten repräsentieren, müssen sie immer der Bedingung  $p_b, p_l \geq 0$  genügen. In diesem Fall ist auch die Einhaltung der unteren Grenze durch  $p_{ges}$  gegeben.
- Maximalitätskriterium: Die Summe der Terme  $p_b$  und  $p_l$  darf zu keinem Zeitpunkt die obere Grenze  $p_{ges} = 1,0$  überschreiten.

Für den Nachweis des Minimalitätskriteriums müssen die Terme einzeln betrachtet werden. Die in Formel 4-3 dargestellte Beziehung für  $p_l$  ist unter der Voraussetzung  $P_e \in [0;1,0]$  immer erfüllt. Für den Term  $p_b$  kann durch Ansetzen  $p_b \geq 0$  in der Formel 4-7 die in der Formel 4-12 dargestellte Beziehung gebildet werden.

$$\frac{\lambda}{\mu} \geq \frac{1 - P_e}{1 - P_e^{L_r + 1}} \quad (4-12)$$

Diese beschreibt die für ein gegebenes  $P_e$  geltende Minimallast zur Erfüllung des Minimalkriteriums. Wie ebenfalls in 4-12 ersichtlich ist, kann eine Unabhängigkeit dieses Lastkriteriums von  $L_r$  nicht angesetzt werden. Bei der Umstellung von 4-12 nach  $L_r$  ergibt sich 4-13. Hierdurch wird ausgedrückt, ab welchem Wert von  $L_r$  eine gültige Beschreibung für  $p_b$  in Abhängigkeit der Eingangsparameter  $P_e$  und  $\lambda/\mu$  möglich ist.

$$L_r \geq \log_{P_e} \left( 1 - \frac{1 - P_e}{\frac{\lambda}{\mu}} \right) - 1 \quad (4-13)$$

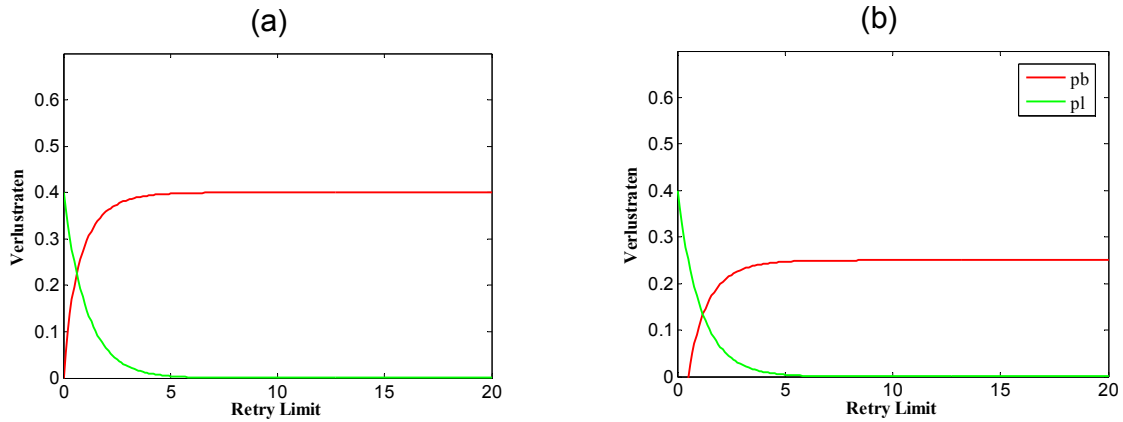


Abbildung 4.5: Verhalten der Verlustraten für verschiedene Werte von  $\lambda/\mu$  (a:1,0; b:0,8)

Betrachtet man den Randwert  $L_r=0$  in 4-12, so ist ersichtlich, dass hier nur eine Gültigkeit für  $\lambda/\mu = 1,0$  erzielt werden kann, was einer vollen Auslastung entspricht. Das bedeutet, dass eine uneingeschränkte Gültigkeit des Modells nur für diese Lastsituation möglich ist. In der Abbildung 4.5 wird der beschriebene Sachverhalt dargestellt. Während in der Situation (a) die Gültigkeit eingehalten werden kann, ist in der Situation (b) ersichtlich, dass die Bedingung  $p_b \geq 0$  nicht für alle Werte von  $L_r$  gilt.

#### 4.2.3.2 Analytische Betrachtung der Optimierungslösungen

Für eine optimale Fehlerschutzeinstellung ist es erforderlich, eine der in Abschnitt 4.2.2 gefundenen Optimallösungen für die Einstellung auszuwählen. Dafür ist der Nachweis erforderlich, ob es sich bei den gefundenen Lösungen um ein Minimum oder Maximum handelt. Ein Optimum im Sinne der Verlustraten muss immer ein Minimum sein. Der Nachweis, um welche Art Extremwert es sich bei den Lösungen handelt, ist durch eine detailliertere Betrachtung des Verhaltens der ersten Ableitung der Gesamtfehlerrate  $p_{ges}$  möglich. Der Nachweis eines Minimums oder Maximums kann durch Betrachtung des Vorzeichenwechsels der Funktion  $p'_{ges}(L_r)$  erfolgen. Ein Wechsel des Vorzeichens von negativ auf positiv entspricht einem Wechsel der Stetigkeit von fallend auf steigend und zeigt ein lokales Minimum an. Ein Wechsel von positiv auf negativ entspricht einem lokalen Maximum. Zu betrachten sind jetzt die in 4-11 dargestellte Lösung sowie die Situation für  $L_r \rightarrow \infty$ . In der Abbildung 4.6 ist das Verhalten der Funktionen  $p_{ges}(L_r)$  sowie  $p'_{ges}(L_r)$  für die Parametrierung  $\lambda/\mu = 1,0$  und  $P_e = 0,4$  dargestellt. Deutlich

erkennbar und nachweisbar ist die Herausbildung eines lokalen Maximums bei der Lösung aus 4-11. Für die Lösung  $L_r \rightarrow \infty$  ergibt sich ein absolutes Minimum, da sich die Funktion von negativer Seite asymptotisch gegen Null annähert.

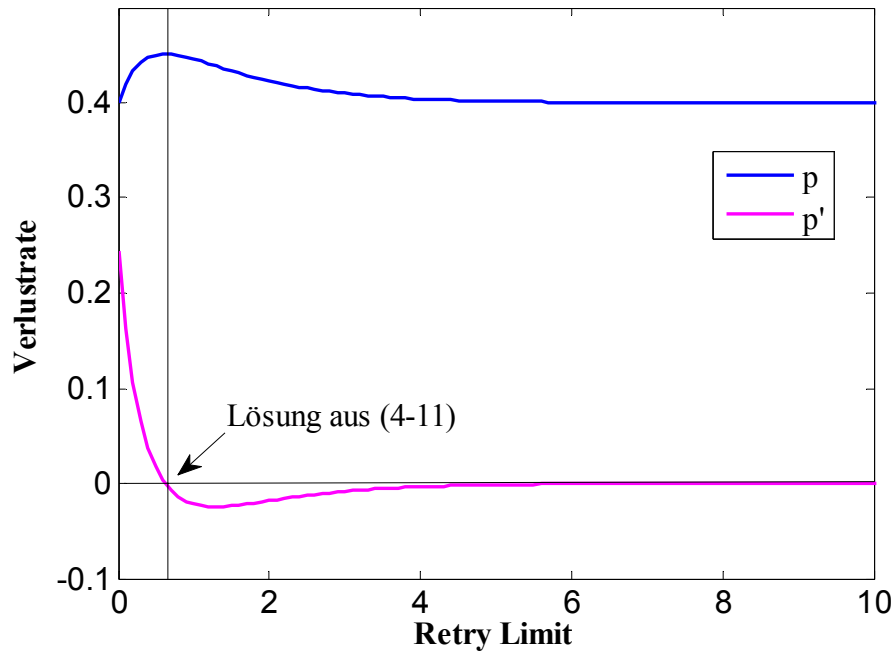


Abbildung 4.6: Verhalten der Gesamtverlustrate und der ersten Ableitung

Für Werte  $\lambda/\mu < 1,0$  konnte weiterhin gezeigt werden, dass sich am Punkt  $L_{r_{opt}}$  nach 4-11 gar kein Extremwert ausbilden kann, da die Funktion  $p'_{ges}(L_r)$  keine Nullstelle mehr besitzt. Der Nachweis der Arten der einzelnen Extremwerte liefert eine wichtige Aussage für die Einstellung des Fehlerschutzes durch den Parameter  $L_r$ . Es ist festzustellen, dass eine Minimierung der Gesamtverlustrate dann möglich ist, wenn ein möglichst großes  $L_r$  gewählt wird. Im Gegensatz zur Interpretation der Lösungen in [64] kann die Lösung in der Formel 4-11 nicht als Minimum nachgewiesen werden. Es tritt an der Stelle entweder ein Maximum oder kein Extremwert auf.

#### 4.2.3.3 Simulative Analyse

Um bessere Aussagen über das Verhalten der Fehlerraten  $p_l$  und  $p_b$  in einem realen System zu erlangen, wurde unter Verwendung der Simulationsumgebung im Anhang A ein simulativer Nachweis anhand einer Übertragung im WLAN nach IEEE 802.11 durchgeführt. Dieser Nachweis dient dazu, die Ergebnisse der analytischen Betrachtung

besser gewichten zu können. Insbesondere soll eine Bewertung der Eignung des gewählten Modellansatzes erfolgen. In der Simulation werden die verschiedenen Lastsituationen anhand verschiedener CBR-Verkehrslasten erzeugt. Verschiedene Fehlersituationen werden durch Parametrierung des Simulationsmodells mit zwei unterschiedlichen Entfernungen 30m und 40m erreicht. Die erzielten Ergebnisse für zwei verschiedene Last- und Fehlersituationen sind in der Abbildung 4.7 dargestellt.

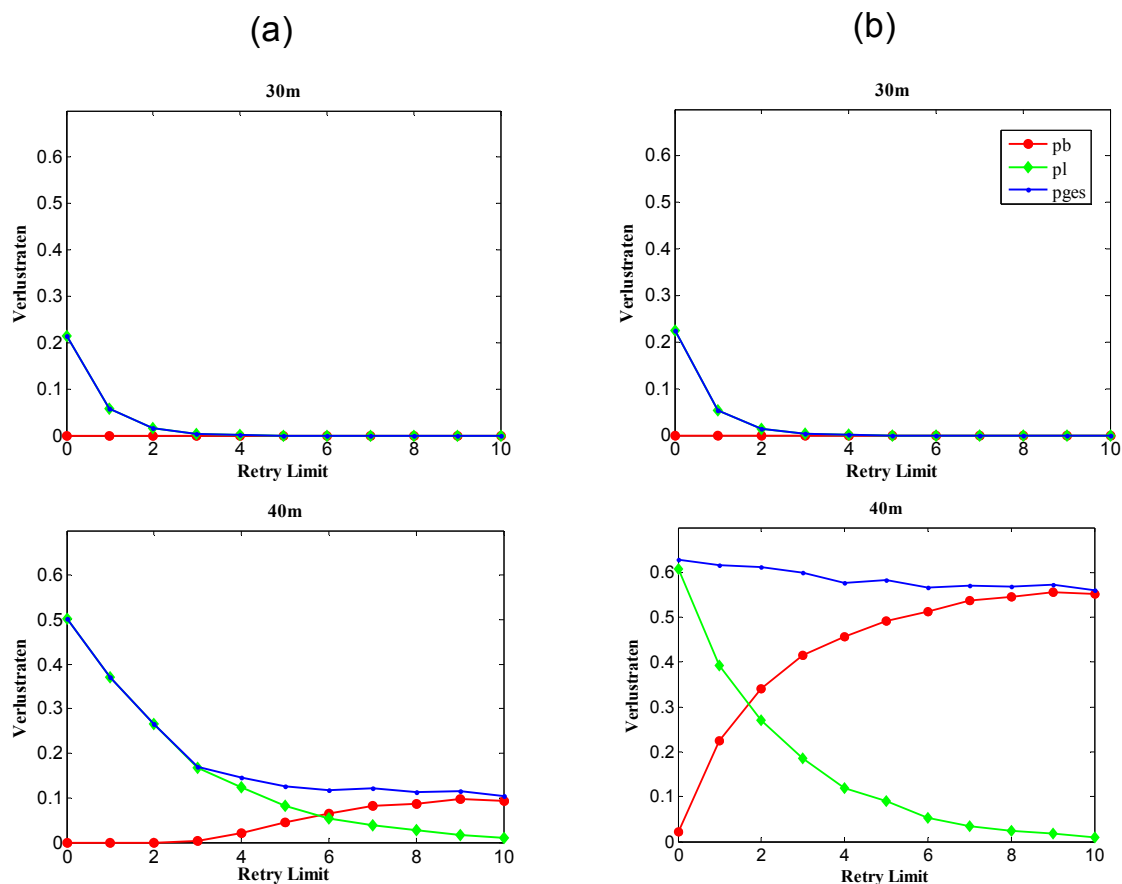


Abbildung 4.7: Verhalten der Verlustraten simulativ (a: 2048 kbit/s, b: 4096 kbit/s)

Das Verhalten bei wenigen Übertragungsfehlern (Entfernung 30m) ist bei beiden Lastsituationen gleich. Der Verlauf von  $p_l$  entspricht dem Verlauf, wie er auch im Modell vorliegen würde. Unterschiede zum Modell ergeben sich beim Verhalten von  $p_b$ . Anhand der Betrachtungen im Abschnitt 4.2.3.1 würde hier keine Gültigkeit des Modells vorliegen. In der Simulation ergibt sich ein Verlauf  $p_b = 0$ , das heißt es treten keine Überlastverluste auf. Auch beim Verhalten bei hohen Übertragungsfehlern (Entfernung 40m) ergibt sich ein

Verlauf von  $p_l$  wie er aus dem Modell zu erwarten ist. Unterschiede ergeben sich beim Verlauf von  $p_b$ . Bei einer niedrigen Last ergibt sich ein von der Modellierung unterschiedliches Verhalten, da der Anstieg in der Simulation nicht steil erfolgt, wie in der Modellgleichung. Bei einer hohen Last stimmt das Verhalten von  $p_b$  mit dem des modellierten überein. Unterschiede ergeben sich auch beim Nachweis der Extremwerte. Wie die Grafiken der simulativ ermittelten Kurvenverläufe von  $p_l$  und  $p_b$  zeigen, konnte die Herausbildung eines Extremwertes  $L_{r\,opt}$  nach Formel 4-11 in keinem der untersuchten Szenarien nachgewiesen werden. Eine Minimierung der Gesamtverlustrate  $p_{ges}$  wird dagegen in allen betrachteten Last- und Fehlerfällen bei maximalem  $L_r$  erreicht.

#### 4.2.4 Fazit für den Entwurf eines selbstoptimierenden Fehlerschutzes

Das ARQ-Protokoll stellt einen effektiven und sehr einfach implementierbaren Ansatz zur Realisierung eines Fehlerschutzes in drahtlosen lokalen Netzen dar. Über die Variation des Retry Limits  $L_r$  ist es möglich, die Wirksamkeit des Fehlerschutzes von ARQ zu beeinflussen, was für eine Einstellung genutzt werden kann. Für den praktischen Einsatz von ARQ ist ein Sendepuffer erforderlich, der dabei in die Betrachtungen einbezogen werden muss. Einen Modellansatz für eine ARQ-Übertragung von Datenrahmen liefert das Fluid Model, auf dessen Basis eine analytische Beschreibung der Verlustraten der Übertragung  $p_l$  und des Pufferüberlaufs  $p_b$  ermöglicht wird. Das Ziel der Fehlerschutzeinstellung ist es, einen Wert  $L_{r\,opt}$  zu ermitteln, bei dem ein minimaler Gesamtverlust erzielt werden kann. In der Literatur [64] wurde ein Verfahren angegeben, das von einer optimalen Einstellung ausgeht, wenn die Übertragungs- und Pufferverluste in der gleichen Größenordnung liegen. Um die Gültigkeit dieses Ansatzes zu prüfen wurden umfangreiche analytische und simulative Untersuchungen durchgeführt. Die im Abschnitt 4.2.3 erzielten Ergebnisse zeigen einen Ausschnitt aller insgesamt durchgeführten Analysen und Simulationen. Anhand der analytischen Betrachtungen konnte zunächst gezeigt werden, dass der Modellansatz keine uneingeschränkte Gültigkeit in den relevanten Bereichen der Eingangsparameter besitzt. Es hat sich bei allen Untersuchungen weiterhin herausgestellt, dass sich die in [64] getroffene Feststellung der Herausbildung eines lokalen Minimums der Gesamtverlustrate bei  $p_l = p_b$  nicht bestätigt. Vielmehr ergibt sich die Herausbildung eines Maximums an diesem Punkt bei hohen Last- und Fehlersituationen. Eine Minimierung der Gesamtverlustrate konnte anhand des Modells bei einer Maximierung des Fehlerschutzes, das heißt bei einem möglichst großen  $L_r$  erreicht werden.

Dieses analytisch nachweisbare Verhalten konnte durch die Simulationsergebnisse verifiziert werden. Da diese Betrachtung keine mathematisch geschlossene Lösung erlaubt, ist es für den Entwurf eines optimalen Einstellverfahrens sinnvoll, einen empirischen Ansatz zu verfolgen. Ein Einstellverfahren muss so ausgerichtet werden, dass ein maximaler Fehlerschutz eingestellt wird, das heißt wenn gilt:  $L_{r_{opt}} = L_r \rightarrow \infty$ . Hier geht der Anteil  $p_l \rightarrow 0$ , was gleichzeitig die Gesamtverluste minimiert.

### 4.3 Neues adaptives Verfahren zur selbstoptimierten Einstellung des Fehlerschutzes

#### 4.3.1 Problemstellung und Anforderungen

Für die Umsetzung des Modellansatzes ist die Spezifikation eines Einstellverfahrens erforderlich, das in der Lage ist, ein optimales Retry Limit  $L_{r_{opt}}$  adaptiv einzustellen. Wie die Analysen gezeigt haben, ist eine optimale Einstellung immer dann gegeben, wenn der Fehler bei der Übertragung über den physikalischen Kanal minimiert werden kann, das heißt bei einem maximal eingestellten Retry Limit. Da diese Einstellung für eine praktische Implementierung nicht anwendbar ist, muss der zu entwerfende Algorithmus ein Grenzwertkriterium enthalten, wann der Fehlerschutz ausreichend genug ist. Gegenüber dem in [64] vorgestellten Verfahren kann eine maßgebliche Vereinfachung erreicht werden, da für die Einstellung nur die Verlustrate  $p_l$  herangezogen werden muss. Wichtig ist, dass das Verfahren auf sich ändernde Randbedingungen schnell adaptiv reagieren kann, insbesondere dann, wenn eine Verschlechterung der Übertragungsbedingungen eintritt.

#### 4.3.2 Vorschlag des neuen Einstellverfahrens SORA

Ausgehend von den Analysen des Verhaltens von  $p_l$  und  $p_b$  wird für das neue Einstellverfahren ein Arbeitspunkt gewählt, der eine Minimierung der Verluste bei der Übertragung ermöglicht. In der Abbildung 4.8 ist der Ansatz für das neue Einstellverfahren in Abgrenzung zu anderen Verfahren dargestellt. Die Standardeinstellung ist immer ein festes Retry Limit bei einem definierten Wert (in IEEE 802.11 gilt  $L_r = 7$ ). Das in [64] entworfene RTRA-Verfahren verwendet als Einstellbasis die Bedingung  $p_l = p_b$ . In dem

hier vorgestellten neuen Ansatz wird als Optimalitätskriterium  $p_l \leq p_{l_s}$  angesetzt, wobei  $p_{l_s}$  ein zu parametrisierender Schwellwert ist.

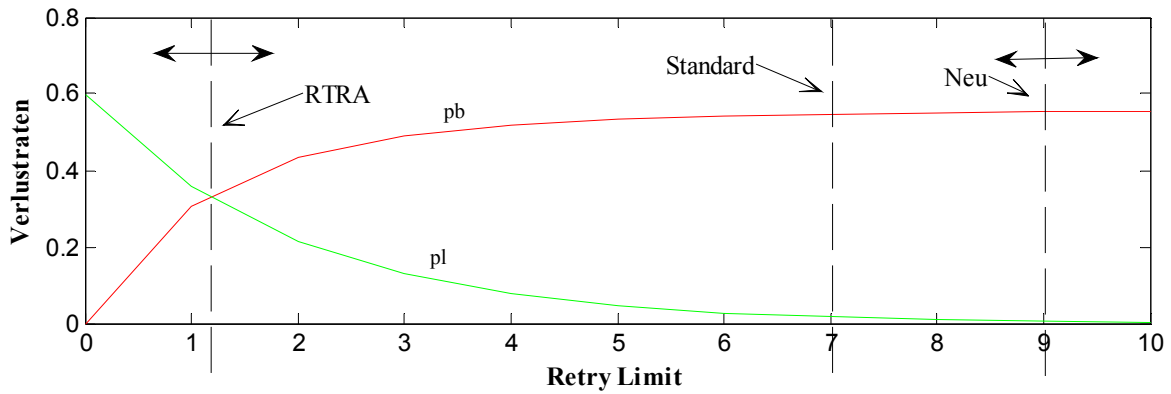


Abbildung 4.8: Ansatz und Abgrenzung des neuen Einstellverfahrens für  $L_{r_{opt}}$

$$L_{r_{opt}} \geq \log_{p_e} p_{l_s} - 1 \quad (4-14)$$

$$L_{r_{opt}} = \left\lceil \frac{\lg p_{l_s}}{\lg p_e} - 1 \right\rceil \quad (4-15)$$

In Anlehnung an die Modellierung von  $p_l$  wird für die Berechnung von  $L_{r_{opt}}$  die Formel 4-14 angesetzt, die sich aus der Umstellung der Formel 4-3 unter Einführung von  $p_{l_s}$  ergibt. Für die Implementierung dieser Berechnung wird 4-14 angepasst und als 4-15 ausgedrückt. Hierbei wird immer ein ganzzahliger Wert für das Retry Limit erhalten.

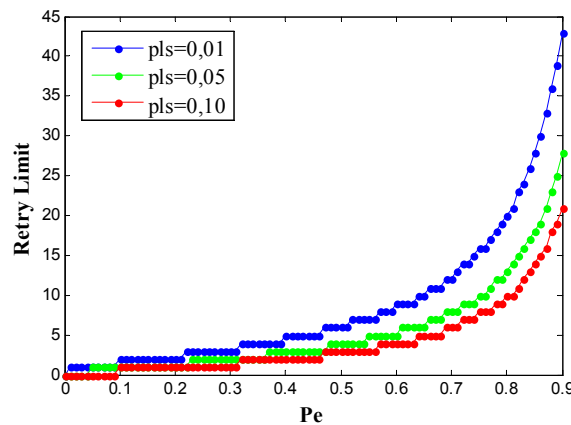


Abbildung 4.9: Berechnung der Retry Limits für verschiedene Werte von  $p_{l_s}$

Die beispielhafte Berechnung der Retry Limits nach 4-15 ist in der Abbildung 4.9 gezeigt. Basierend darauf wurde ein Algorithmus zur ständigen Ermittlung von  $L_{r_{opt}}$  in einer drahtlosen Netzchnittstelle entworfen. Der Ablauf ist in der Abbildung 4.10 dargestellt.

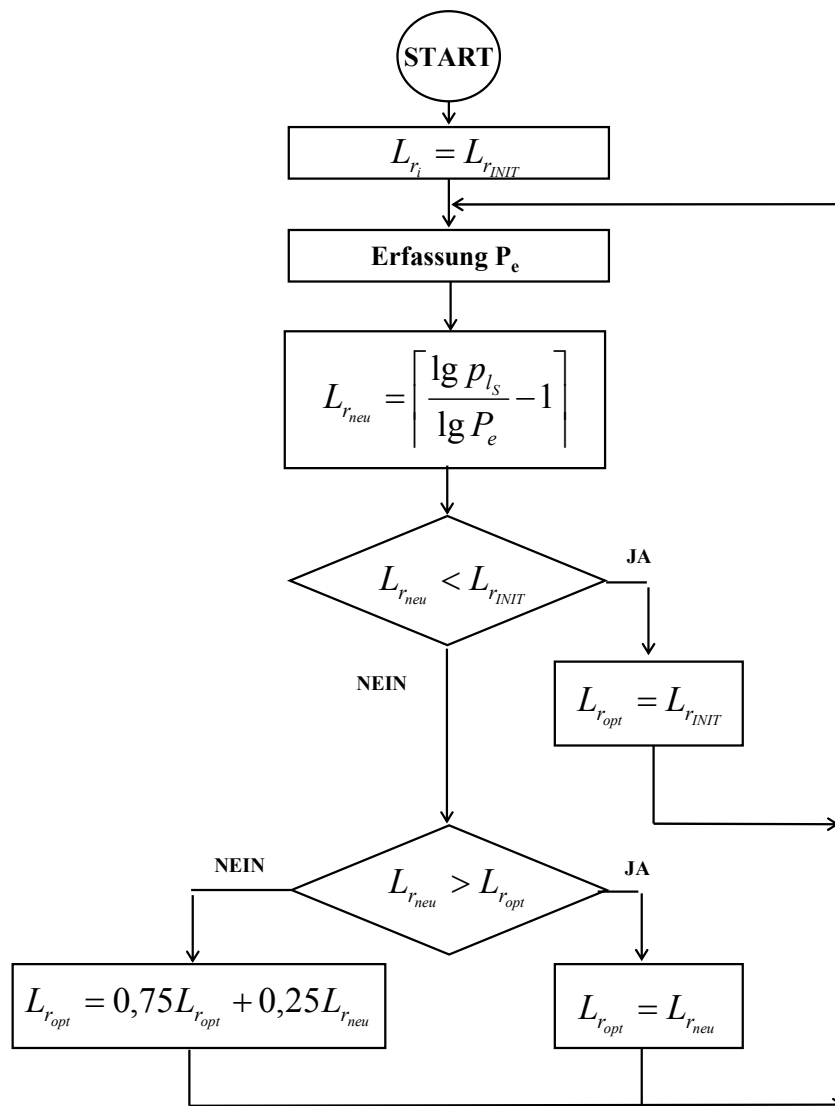


Abbildung 4.10: Algorithmus zur Ermittlung von  $L_{r_{opt}}$

Neben der Berechnung eines neuen  $L_{r_{opt}}$  auf Basis von  $P_e$  werden im Algorithmus einige weitere Randbedingungen berücksichtigt. So wird ein Initialwert  $L_{r_{INIT}}$  eingeführt, der zum einen für die Initialisierung und zum anderen auch als unterer Minimalwert von  $L_{r_{opt}}$  dient. Wird der Initialwert mit der Standardeinstellung  $L_{r_{INIT}} = 7$  belegt, verhält sich das



Einstellverfahren in den unteren Bereichen von  $P_e$  wie das Standardverfahren nach IEEE 802.11. Weiterhin wird eine Unterscheidung bei der Übernahme eines neu berechneten Wertes für  $L_{r\,opt}$  vorgesehen. Wird aufgrund einer Erhöhung von  $P_e$  eine Verschlechterung des Übertragungsverhaltens festgestellt, wird das neu berechnete  $L_{r\,opt}$  direkt übernommen. Bei einem Absinken von  $P_e$  wird hingegen ein Dämpfungsglied in die Berechnung von  $L_{r\,opt}$  eingefügt, damit das Retry Limit sich langsam wieder an den Ausgangswert  $L_{r\,INIT}$  annähert. Auf diese Weise kann ein auftretendes Schwingen von  $L_{r\,opt}$  vermieden werden. Für die Berechnung wird als Schwellwert  $p_{l_s} = 10^{-2}$  vorgeschlagen. Weiterhin wird neben dem Standardwert  $L_{r\,INIT}$  zur Begrenzung ein oberer Maximalwert  $L_{r\,MAX}$  definiert, der bei der Vergabe von  $L_{r\,opt}$  nicht überschritten werden darf. Hierfür wird ein Wert von  $L_{r\,MAX} = 32$  vorgeschlagen. Das neue Verfahren wird im weiteren Verlauf der Arbeit unter dem Namen SORA (Self Optimizing Retry Adaptation) referenziert.

Die Funktionsweise des Einstellverfahrens wurde simulativ untersucht und nachgewiesen. Das Ergebnis ist der Abbildung 4.11 dargestellt. In der Abbildung 4.11 (a) ist das Ergebnis für die Einstellung des Retry Limits bei verschiedenen Entfernungen zwischen Sender und Empfänger in einem WLAN bei einer Senderate von 2 Mbit/s dargestellt. Es ist ersichtlich, dass abhängig von der Entfernung, eine adaptive Einstellung erreicht werden kann.

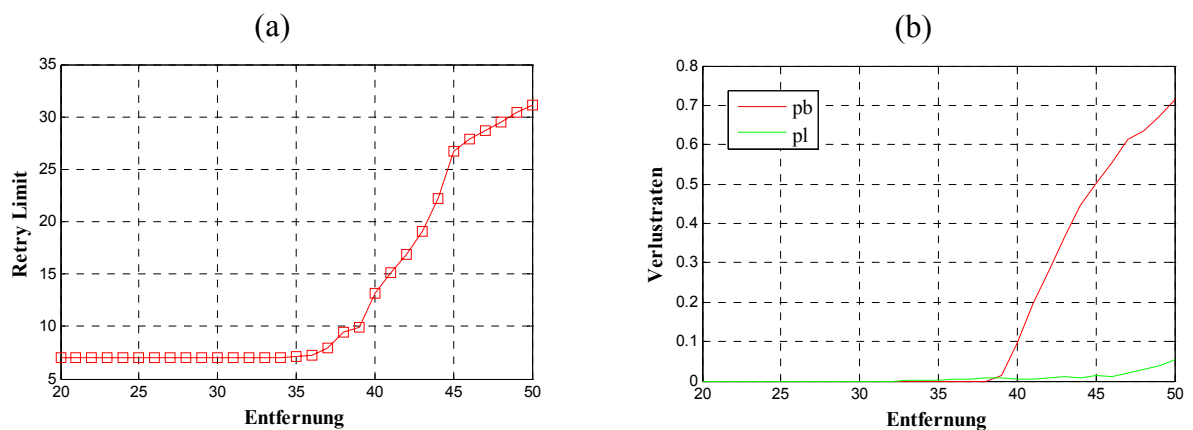


Abbildung 4.11: Vergabe von  $L_{r\,opt}$  (a) und resultierendes Verhalten von  $p_l$  und  $p_b$  (b)

### 4.3.3 Zusammenfassung und Fazit

In dem Abschnitt wird ein neues selbstoptimierendes Verfahren für die Einstellung eines optimalen Retry Limits  $L_{r\,opt}$  zur Anwendung im ARQ Fehlerschutzverfahren vorgeschlagen. Aufgrund der Ergebnisse der vorgelagerten Analysen konnte das neue Verfahren maßgeblich gegenüber bestehenden Verfahren, insbesondere RTRA, vereinfacht werden. Es kann gezeigt werden, dass eine optimale Einstellung des Retry Limits nur auf der Basis der Übertragungsverlustrate  $p_l$  erfolgen kann. Der abgeleitete Algorithmus erlaubt eine adaptive selbstoptimierende Einstellung des Fehlerschutzes in einer Netzschnittstelle.

## 4.4 Adaptive Einstellung des Fehlerschutzes bei einer Übertragung mit mehreren Prioritätsklassen

### 4.4.1 Einleitung und Problemstellung

Der vorangegangene Abschnitt stellt mit dem SORA-Verfahren einen neuen Ansatz für die adaptive Einstellung des Retry Limits beim ARQ-Fehlerschutzverfahren vor. Dabei wurde zunächst von einer Übertragung ohne Prioritätsklassen ausgegangen. Im Folgenden ist es jetzt erforderlich, zu untersuchen und einen Nachweis zu führen, dass das neue SORA-Verfahren auch bei der Übertragung mit mehreren Prioritätsklassen zum Einsatz kommen kann. Dafür ist es in die in der Abbildung 3.2 gezeigte Referenzarchitektur zu integrieren. Dabei sollen beide Varianten des Schedulers (PQ und MAC Scheduler) berücksichtigt werden.

### 4.4.2 Variante 1: Kombination des SORA-Einstellverfahrens mit einem PQ Scheduler

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Integration des vorgeschlagenen neuen SORA-Einstellverfahrens in eine Netzschnittstelle für mehrklassige Übertragung. In einem ersten Ansatz wird dabei eine Netzschnittstelle mit einem zentralen Scheduler in der Station betrachtet, wie sie im Abschnitt 3.2.4.4 spezifiziert wurde. Aufgrund der Tatsache, dass die Einstellung des Retry Limits in dem neu vorgeschlagenen Ansatz allein auf der Betrachtung der Verlustrate  $p_l$  ohne Berücksichtigung von  $p_b$  erfolgt, ergeben sich

wesentliche Konsequenzen für die Integration in eine Netzchnittstelle mit mehrklassiger Übertragung. Hierbei werden die Datenströme in mehreren unabhängigen Warteschlangen zwischengespeichert. Durch ein Scheduling Verfahren wird festgelegt, wie die Pakete in den einzelnen Warteschlangen bei der Übertragung priorisiert werden. Daraus ergibt sich für jede Klasse eine spezifische Servicerate  $\mu_i$ . Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass der zu übertragende Datenverkehr in den einzelnen Klassen eine spezifische Ankunftsrate  $\lambda_i$  aufweist. Es ergibt sich daher in jeder Klasse eine spezifische Verlustrate  $p_{b_i}$  der Überlastverluste. Die Verlustrate  $p_l$  der Übertragungsverluste gilt jedoch für alle Klassen gleichermaßen, kann also als klassenunabhängig angesehen werden. Da nach dem neu vorgestellten Verfahren die Einstellung des Retry Limits nur darauf beruht, lässt sich ableiten, dass die Einstellung des Fehlerschutzes von dem mehrklassigen Queueing entkoppelt und für alle Klassen gleich erfolgen kann. Dieser Ansatz ist in der Abbildung 4.12 dargestellt.

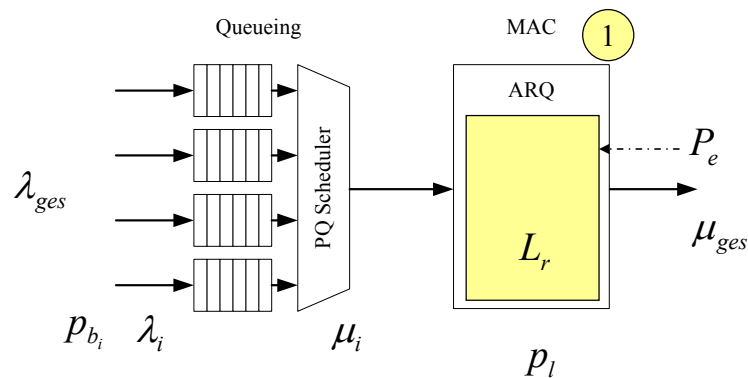


Abbildung 4.12: Integration des SORA-Verfahrens beim Einsatz des PQ Schedulers

Durch den gewählten lastunabhängigen Ansatz lässt sich die Komplexität der Netzchnittstelle gegenüber einer klassenspezifischen Einstellung des Retry Limits maßgeblich vereinfachen, da der Fehlerschutz für alle Klassen durch ein einheitliches Verfahren vergeben wird. Die Einstellung ist damit in einem einzigen Schritt möglich. Die Funktionsweise des Ansatzes wird in einem ersten Schritt durch einen Verifikationstest geprüft. Hierbei wird analog zu der im Abschnitt 3.3 durchgeführten Analyse der Referenzverfahren eine vergleichbare Analyse des neuen Ansatzes durchgeführt. Die erhaltenen Ergebnisse sind in der Abbildung 4.13 dargestellt. Bei der Verkehrslast zeigt sich in der Konstellation der SORA-Fehlerschutzeinstellung mit dem PQ Scheduling ein optimales Verhalten. Beim Fehlverhalten ist ebenfalls eine Differenzierung der einzelnen Klassen erkennbar. Allerdings ist diese nicht sehr stark ausgeprägt, so dass auch noch Untersuchungen mit anderen Scheduling-Verfahren erforderlich sind. In einem folgenden

Schritt soll zunächst jedoch eine vertiefte Vergleichsanalyse und Abgrenzung zu dem bereits bestehenden RTRA-Verfahren durchgeführt werden.

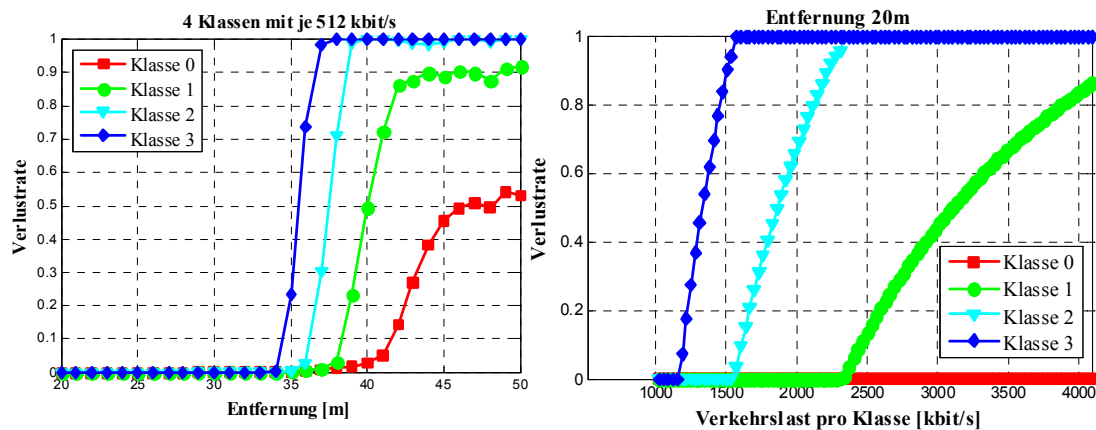


Abbildung 4.13: Fehler- und Lastverhaltens beim Einsatz eines PQ Schedulers

#### 4.4.3 Abgrenzung der Einstellung eines priorisierten Fehlerschutzes zum RTRA Verfahren

Da auch das RTRA-Verfahren nach [64] auf einem PQ Scheduling-Ansatz beruht, ist ein Vergleich des neuen SORA-Ansatzes und RTRA zur Bewertung sinnvoll. Betrachtet man die in der Abbildung 4.13 dargestellten Ergebnisse im Vergleich zu denen in der Abbildung 3.8, ist zu erkennen, dass beim Fehlerverhalten gegenüber dem RTRA-Verfahren eine geringfügige Verbesserung der Robustheit der hochpriorien Klasse erreichbar ist. Das Lastverhalten kann gegenüber dem von RTRA vor allem in der hochpriorien Klasse verbessert werden, da RTRA hier über den gesamten betrachteten Abschnitt keine verlustfreie Übertragung gewährleisten kann, sollen die Ursachen dafür tiefergehend untersucht werden.

Der wesentliche Unterschied zwischen dem SORA-Verfahren und dem RTRA-Verfahren besteht darin, dass beim RTRA-Verfahren auch die Lastabhängigkeit in der Einstellung berücksichtigt wird. Das RTRA-Verfahren verwendet dabei einen zentralen Ansatz zur Lasterfassung und verteilt den Fehlerschutz auf mehrere Klassen. Der Algorithmus bezieht immer die Gesamtlast aller Klassen ein und versucht, ein Gesamtoptimum zu finden. Unter Einhaltung des Gesamtoptimums erfolgt eine Vergabe des Retry Limits nach Priorität. Dabei wird im RTRA-Verfahren, wie in der Abbildung 4.14 dargestellt, in zwei Schritten

vorgegangen. Zuerst wird über alle Klassen das Gesamtoptimum ermittelt. Dafür wird ein Algorithmus nach dem Modell aus Abschnitt 4.2.2 verwendet.

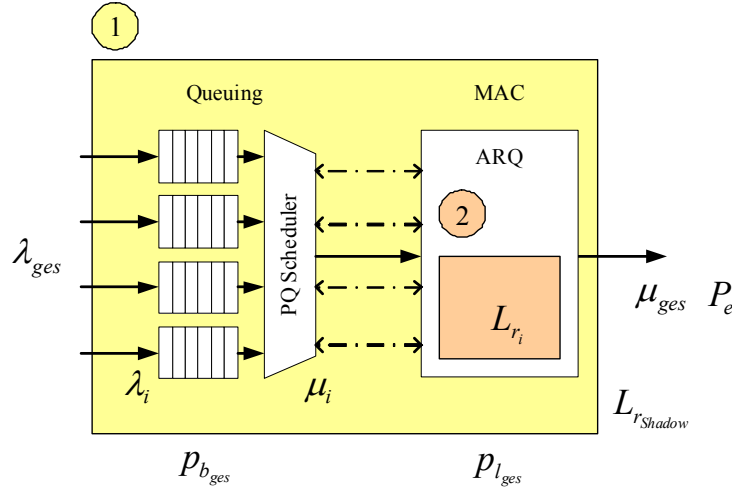


Abbildung 4.14: Zentrale Einstellung des priorisierten Fehlerschutzes in zwei Schritten

Dieser Algorithmus hält das Gleichgewicht der Paketfehlerraten  $p_{b_{ges}}$  und  $p_{l_{ges}}$ , die über alle Klassen gelten. Ergebnis der Einstellung ist ein Shadow Retry Limit  $L_{r_{Shadow}}$  für alle Klassen zur Einstellung des Gesamtoptimums. Da durch diese Einstellung noch keine Berücksichtigung der unterschiedlichen Prioritäten der einzelnen Klassen gewährleistet ist, muss dies durch einen zweiten nachgelagerten Algorithmus erfolgen. Hierfür werden in [64] zunächst einige Annahmen getroffen. Ausgehend von der Definition einer mittleren Anzahl von Sendeversuchen (Formel 4-4) in einem einklassigen System wird eine systemweite mittlere Anzahl von Sendeversuchen für ein mehrklassiges System nach Formel 4-16 verwendet, wobei die einzelnen  $\bar{J}_i$  durch die Serviceraten der einzelnen Warteschlangen  $\mathbf{M} = [\mu_0 \quad \mu_1 \quad \mu_2 \quad \dots \quad \mu_{L_c}]$  gewichtet werden.

$$\bar{J}_{ges}(\mathbf{L}_r, P_e) = \frac{\mathbf{M} \cdot \bar{\mathbf{J}}(\mathbf{L}_r, P_e)}{\mathbf{M} \cdot \mathbf{1}} \quad (4-16)$$

Es konnte in [64] weiter nachgewiesen werden, dass eine optimale Lösung für den Vektor  $\mathbf{L}_r$  immer genau dann existiert, wenn die Bedingung  $\bar{J}_{ges}(\mathbf{L}_r, P_e) = \bar{J}_{Shadow}(L_{r_{Shadow}}, P_e)$  erfüllt ist. Auf dieser Basis wurde ein heuristischer Einstellalgorithmus vorgeschlagen, der die Prioritäten der einzelnen Klassen berücksichtigt. Dieser gewährt zunächst allen Klassen einen maximalen Fehlerschutz und reduziert diesen, beginnend bei der Klasse mit der niedrigsten Priorität, so weit, bis die Optimalitätsbedingung erfüllt ist. Da aus der Analyse

im Abschnitt 3.3.4 bekannt ist, dass das RTRA Verfahren ein nicht zufriedenstellendes Lastverhalten aufweist, wird der Ablauf der Einstellung im Folgenden anhand eines Beispiels analysiert. Betrachtet werden muss dabei zunächst das Verhalten von  $L_{r_{Shadow}}$ , da es als Ergebnis des ersten Schrittes die optimale Fehlerschutzeinstellung über alle Klassen repräsentiert. In der Abbildung 4.15 ist das resultierende  $L_{r_{Shadow}}$  für eine Sender-Empfänger Entfernung von 30m für verschiedene Lastsituationen dargestellt. Aufgezeichnet wurde die Schwankungsbreite und der Mittelwert für  $L_{r_{Shadow}}$ .

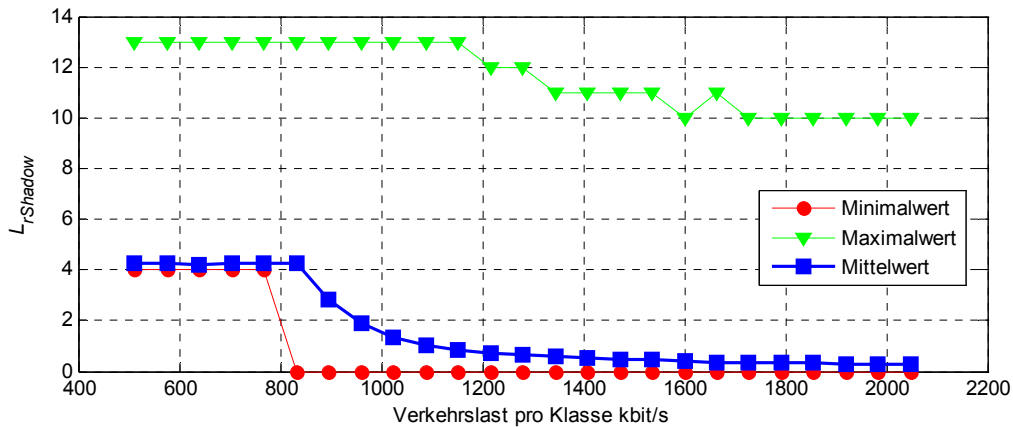


Abbildung 4.15: Verhalten von  $L_{r_{Shadow}}$  in Abhängigkeit von der Verkehrslast

Obwohl bei allen Lastsituationen der fast gesamte Einstellraum für  $L_{r_{Shadow}}$  genutzt wurde, ist deutlich sichtbar, dass bei steigender Verkehrslast dessen Mittelwert sinkt und bereits bei relativ geringen Lasten (unter 1 Mbit/s pro Klasse) der Minimalwert 0 erreicht wird. Aus dem ermittelten  $L_{r_{Shadow}}$  und dem gegebenen  $P_e$  wird unter Nutzung der Formel 4-4 das Optimalitätskriterium  $\bar{J}_{Shadow}$  berechnet, das für den Einstellalgorithmus im zweiten Schritt benötigt wird. In der Abbildung 4.16 ist der Verlauf von  $\bar{J}_{Shadow}$  in Abhängigkeit von  $L_{r_{Shadow}}$  und  $P_e$  dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich eine nichtlineare Begrenzung des Einstellraumes ergibt. Daraus folgt, dass kleine Änderungen bei der Bestimmung des Gesamtoptimums im ersten Schritt durchaus zu großen Schwankungen bei der Einstellung des Fehlerschutzes in den einzelnen Klassen führen können.

Eine besondere Rolle kommt weiterhin dem Punkt für  $L_{r_{Shadow}} = 0$  zu. Aus Sicht der Einstellung im ersten Schritt wäre dieser Wert erlaubt. Hier gilt jedoch in jedem Fall  $\bar{J}_{ges}(\mathbf{L}_r, P_e) = 1$ , wobei dies nur erreicht werden kann, wenn die Retry Limits aller Klassen auch zu null werden, das heißt es gilt  $\mathbf{L}_r = \mathbf{0}$ , was einer Abschaltung des kompletten Fehlerschutzes entspricht.

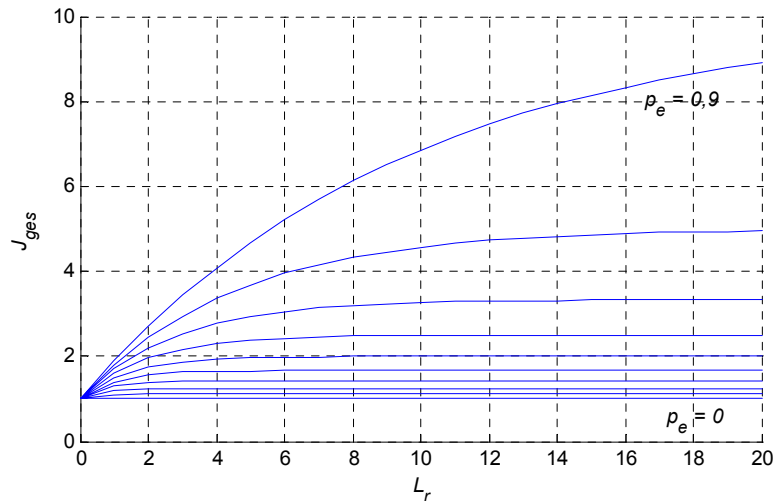


Abbildung 4.16: Verlauf der systemweiten mittleren Anzahl der Sendeversuche

Schwankt der Algorithmus zur Bestimmung von  $L_{r_{Shadow}}$  zwischen 0 und 1 ergeben sich so Stabilitätsprobleme bzw. sehr hohe Schwankungen der Retry Limits in den Klassen. Für eine stabile Arbeitsweise wäre also eine zusätzliche Begrenzung des Einstellraumes um  $L_{r_{Shadow}} \geq 1$  erforderlich. In der Abbildung 4.17 ist die resultierende Vergabe der Retry Limits für die einzelnen Klassen dargestellt.

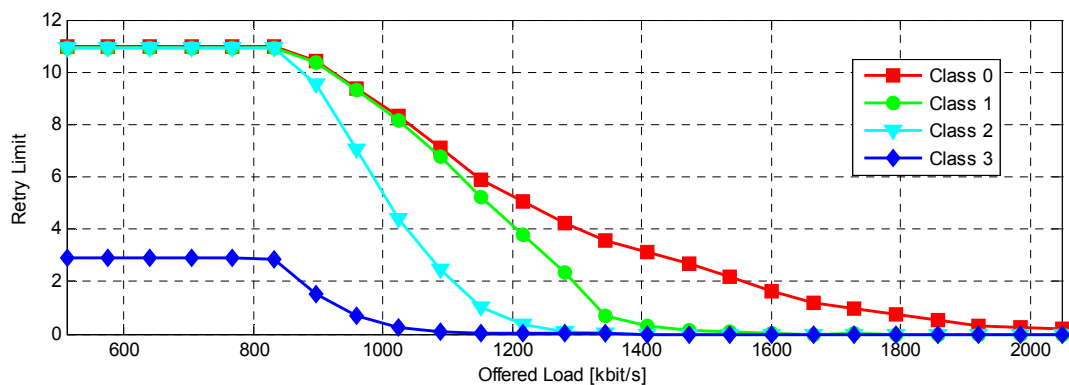


Abbildung 4.17: Verteilung der Retry Limits auf die Klassen

Es ist erkennbar, dass ab einer gewissen Verkehrslast, in diesem Fall ab 850 kbit/s, eine stabile Vergabe der Retry Limits nicht mehr erfolgt. Betroffen sind davon alle Verkehrsklassen, auch die mit der höchsten Priorität. Durch dieses Verhalten lässt sich die im Abschnitt 3.3.4 analysierte Lastempfindlichkeit des RTRA-Verfahrens erklären. Die zentrale Einstellung des RTRA Verfahrens versucht, ein globales Optimierungsziel über alle Klassen bei der Einstellung des Fehlerschutzes zu erreichen. Dafür wird ein zweistufiger Algorithmus eingesetzt, wobei der erste Schritt für die optimale Einstellung für alle Klassen und der zweite Schritt für die Aufteilung des Fehlerschutzes auf die Klassen anhand ihrer Priorität sorgt. Ein Problem bei dieser Einstellung entsteht immer dann, wenn das Gesamtoptimum nicht gehalten werden kann. Dann wird aufgrund von hoher Last in niederpriorien Klassen, der zu vergebende Fehlerschutz weit heruntergefahren. Dies führt dazu, dass auch hochpriorie Klassen keinen ausreichenden Fehlerschutz erhalten. Hinzu kommen Stabilitätsprobleme der Einstellung in Grenzsituationen. Dies alles führt zu einer Einstellung mit nicht ausreichender Service Differenzierung zwischen den Prioritätsklassen.

#### **4.4.4 Variante 2: Kombination des SORA-Einstellverfahrens mit einem MAC Scheduler**

Wie bereits im Abschnitt 3.2.4 herausgearbeitet wurde, besitzt eine mehrklassige Netzschnittstelle mit dem Scheduling im MAC-Verfahren eine höhere Leistungsfähigkeit als eine Netzschnittstelle mit PQ Scheduler. Darüber hinaus lassen sich bei einem MAC-basierten Scheduling-Verfahren Prioritäten zwischen verschiedenen Stationen im Netz erhalten. Von daher ist es erforderlich, die Funktionalität des im Abschnitt 4.3 vorgeschlagenen Einstellverfahrens für den Fehlerschutz auch für Schnittstellen mit MAC-basiertem Scheduling nachzuweisen. Zudem wird erwartet, dass sich die in der Abbildung 4.13 gezeigten Ergebnisse für das Fehlerverhalten durch den Einsatz des MAC Scheduling noch verbessern lassen.

Das neue SORA-Einstellverfahren für das Retry Limit wurde hierfür im Rahmen eines MAC Scheduling am Beispiel von IEEE 802.11e betrachtet. Verglichen zum PQ Scheduler in einer Station sind beim MAC Scheduling zusätzliche Randbedingungen zu berücksichtigen. Der wesentliche Unterschied liegt in der verteilten Betrachtung der Zugangssteuerung zum Medium, die für jede Klasse erfolgen muss. Wie in der Abbildung 4.18 dargestellt, können mehrere Stationen in einem drahtlosen Netz Nutzdaten in



verschiedenen Prioritätsklassen übertragen. Dabei ist die Priorisierung der Klassen direkt mit der Zugriffssteuerung auf das physikalische Medium verbunden.

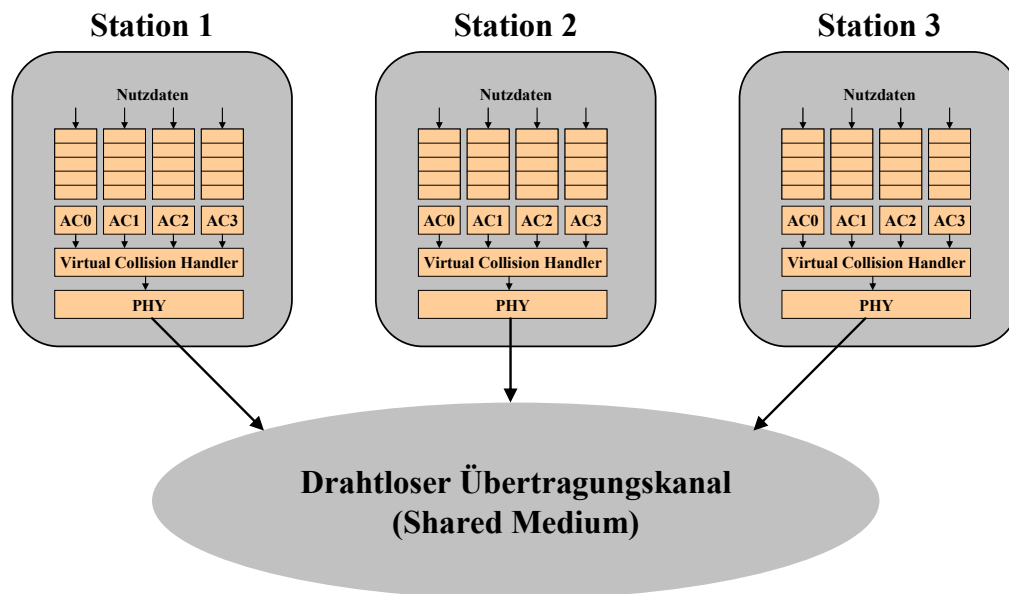


Abbildung 4.18: Verteiltes Scheduling in einem drahtlosen Netz nach IEEE 802.11e

Das heißt, zu einem bestimmten Zeitpunkt erhält immer nur genau eine Klasse einer Station Zugriff auf den drahtlosen Kanal und darf die Nutzdaten versenden. Die dafür notwendige verteilte Steuerung muss durch das MAC-Verfahren realisiert werden. Wie auch im Abschnitt 3.2.4 bereits beschrieben wurde, erfolgt das im Fall von IEEE 802.11e durch den EDCA-Mechanismus, der eine verteilte zufallsbasierte Berechnung der Zugriffszeiten auf den drahtlosen Kanal mit entsprechender Priorisierung erlaubt. Bei dem Betrieb mehrerer Stationen in einem Netz wird angestrebt, Kollisionen beim Medienzugriff zu vermeiden. Jedoch können diese durch das eingesetzte zufallsbasierte Verfahren nicht ganz ausgeschlossen werden. Vorgestellte Analysen in der Literatur bestätigen diese Feststellung [3] [68]. Es ist daher davon auszugehen, dass sich Übertragungsverluste durch Kollisionen mit physikalisch verursachten Verlusten überlagern. Es muss somit untersucht werden, wie das vorgeschlagene Einstellverfahren für das Retry Limit unter diesen Randbedingungen arbeitet.

Bei der Integration des Einstellverfahrens für das Retry Limit in eine Netzschnittstelle für ein MAC Scheduling gelten prinzipiell auch die Schlussfolgerungen aus der Integration bei einem PQ Scheduler. Das heißt, dass die Einstellung des Retry Limits auch hier von der

Funktionalität des Queueings entkoppelt werden kann. Dabei wird für alle Klassen ein einheitliches Retry Limit vorgegeben. Das neue Verfahren unterscheidet sich daher von der Standardeinstellung nach IEEE 802.11e nur durch seine Adaptivität in Abhängigkeit der Fehlerrate der physikalischen Übertragung. In der Abbildung 4.19 wird die Integration des Einstellverfahrens in die Netzschnittstelle dargestellt.

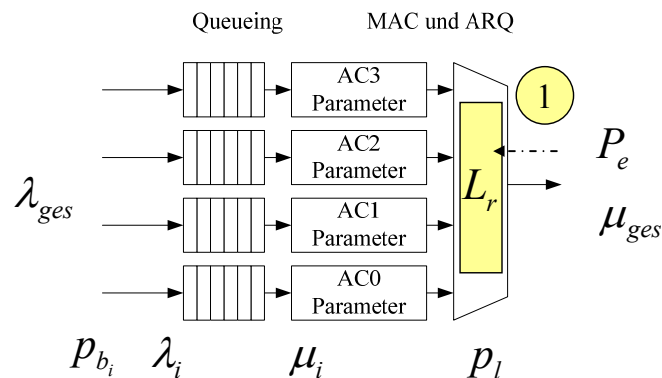


Abbildung 4.19: Integration des SORA-Verfahrens beim Einsatz eines MAC Schedulers

Auch hier ergibt sich, wie beim PQ Scheduler, eine geringere Komplexität als bei einer klassenspezifischen Fehlerschutzeinstellung. Die durchgeführte Adaption des Retry Limits ist gleichfalls konform zum Standard IEEE 802.11e, so dass eine empfangende Netzschnittstelle keine Erweiterungen benötigt, wenn die Adaption des Retry Limits in einer sendenden Netzschnittstelle implementiert wird. Auch hier kann in einem ersten simulativen Verifikationstest die Funktionalität des Verfahrens in der Netzschnittstelle nachgewiesen werden. Die Ergebnisse zeigt die Abbildung 4.20. Es zeigt sich, dass die Kombination der adaptiven Fehlerschutzeinstellung mit dem MAC Scheduling insbesondere beim Fehlerverhalten eine deutliche Verbesserung bei der Robustheit und bei der Skalierung der verschiedenen Übertragungsklassen erreicht. Bei dem dezentralen Ansatz ist zur Bewertung sowohl ein Vergleich mit dem Standardverfahren nach IEEE 802.11e als auch mit dem Ansatz des neuen Einstellverfahrens bei PQ Scheduler sinnvoll. Ein verbessertes Verhalten kann in beiden Fällen insbesondere beim Fehlerverhalten erreicht werden. Hier zeigt sich eine bessere Skalierung der Robustheit der hochpriorären Klasse. Dies lässt erwarten, dass der Bereich der Minimalqualität des so übertragenen skalierbaren Videos erhöht werden kann. Gleichzeitig ergibt sich auch eine Verbesserung der Skalierung. Beim Lastverhalten ergeben sich durch das neue Verfahren keine Änderungen gegenüber dem Verhalten der Standardeinstellung. Dies entspricht den Erwartungen, da die Lasttests in einem Bereich niedriger Übertragungsfehler durchgeführt

wurden. In diesem Bereich verhält sich das Einstellverfahren, wie die Standardeinstellung. Da das Lastverhalten hinsichtlich Robustheit und Skalierung als geeignet eingeschätzt werden kann (siehe auch

), ist dieses Verhalten akzeptabel.

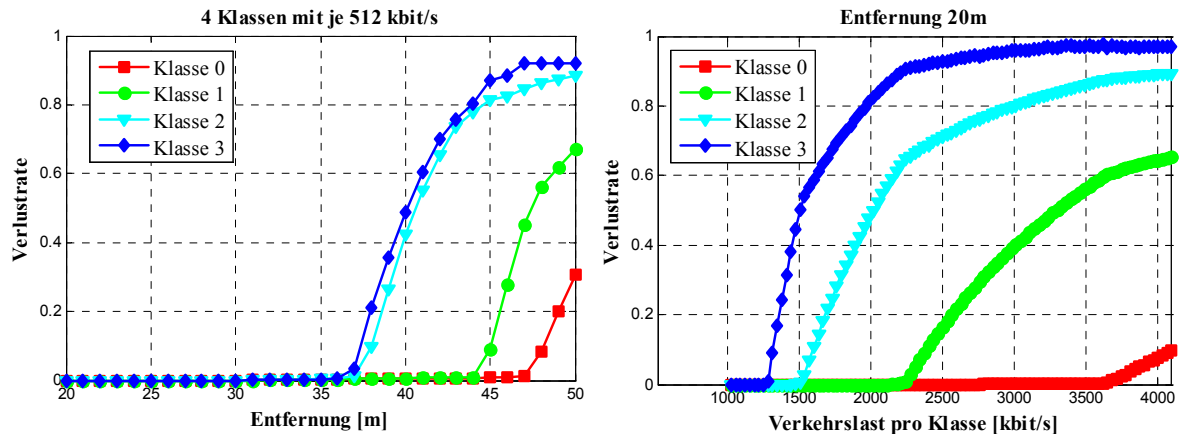


Abbildung 4.20: Fehler- und Lastverhaltens beim Einsatz eines MAC Schedulers

#### 4.4.5 Implementierungsaspekte

Der vorliegende Abschnitt diskutiert die Auswirkungen der SORA-Implementierung im MAC-Verfahren. In der Abbildung 4.21 ist die Integration von SORA in die MAC-Implementierung am Beispiel vom IEEE 802.11e schematisch dargestellt. Auch wenn die MAC-Implementierung selbst hardwarebasiert erfolgt, kann der SORA-Algorithmus als Komponente in die Treibersoftware eingesetzt werden.

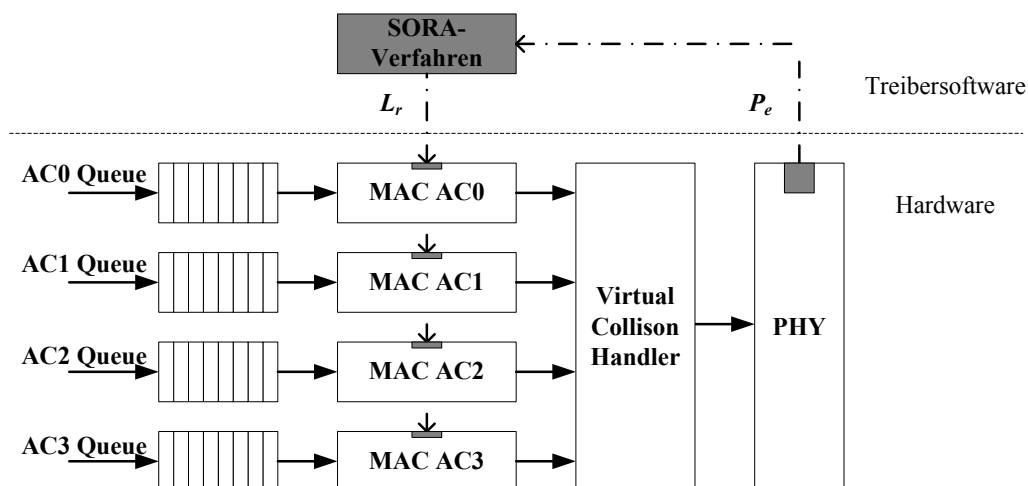


Abbildung 4.21: Integration des SORA-Verfahrens in die MAC-Implementierung

Der verwendete Chipsatz muss dabei zwei Anforderungen erfüllen: Zum einen muss eine Einstellung des Retry Limits über einen Registereintrag möglich sein. Zum anderen ist die Erfassung und softwareseitige Ausgabe des erforderlichen Parameters  $P_e$  notwendig. Ein Zugriff auf das Queueing ist bei der SORA-Implementierung im Vergleich zum RTRA Verfahren nicht erforderlich.

#### **4.4.6 Bewertung und Fazit**

Die Feststellung, dass die Einstellung des Retry Limits rein auf Basis der Übertragungsverlustrate erfolgen kann, hat grundlegende Auswirkungen auf die Integration der adaptiven Fehlerschutzeinstellung in Netzschnittstellen mit mehrklassiger Übertragung. Da somit eine Entkopplung des Fehlerschutzes von den Verlusten beim Queueing erfolgt, ist es aus Sicht der Verlustraten ausreichend, in allen Klassen einen einheitlichen Fehlerschutz vorzugeben. Die Differenzierung zwischen den Klassen erfolgt, wie bei einer statischen Fehlerschutzeinstellung durch das eingesetzte Scheduling-Verfahren. Dies ermöglicht eine starke Vereinfachung der Netzschnittstellen gegenüber einer klassenspezifischen Fehlerschutzeinstellung. Es kann gezeigt werden, dass sich das vorgeschlagene Einstellverfahren für das Retry Limit in Netzschnittstellen für mehrklassige Übertragungen integrieren lässt. Dies gilt sowohl für Schnittstellen mit PQ Scheduler als auch mit MAC Scheduler. In einem ersten Verifikationstest des Verfahrens in beiden Schnittstellenarten kann eine Verbesserung der Gesamtverlustrate nachgewiesen werden. Insbesondere zeigt sich eine sehr gute Kombination des neuen Einstellverfahrens mit einem MAC Scheduling. Für eine allgemeingültige Bewertung des Ansatzes und eine Abschätzung der Wirkungsweise für die Videoebene sind weitere, breiter angelegte Verifikationstests erforderlich. Dies wird Gegenstand des Kapitels 5 sein.

### **4.5 Zusammenfassung und Fazit**

In dem Kapitel wird mit SORA ein neues Verfahren für die selbstoptimierende adaptive Einstellung des Fehlerschutzes in drahtlosen lokalen Netzen vorgestellt. Das Verfahren beruht auf dem ARQ-Fehlerschutzverfahren, dessen Wirkung in drahtlosen Netzen zunächst analysiert und bewertet wird. Als Basis für das neue Einstellverfahren erfolgt die Formulierung eines geeigneten Modells, welches analytisch und durch Simulationen verifiziert wird. Ausgehend von den dabei gewonnenen Erkenntnissen wird ein neuer Einstellalgorithmus vorgeschlagen, der zunächst anhand einer einklassigen Übertragung

bewertet wird. Da für die Übertragung skalierbar codierter Videodaten eine mehrklassige Übertragung erforderlich ist, wird weiterhin eine Analyse der Vergabe des Fehlerschutzes in dem bereits bestehenden RTRA-Verfahren durchgeführt. Dabei auftretende Defizite werden zunächst herausgearbeitet und bewertet. Gleichfalls werden Entwürfe für die Integration des neuen Einstellverfahrens in eine mehrklassige drahtlose Übertragung vorgeschlagen. Die Entwürfe werden simulativ für einen PQ Scheduler und einen MAC Scheduler bewertet. Aus den durchgeführten Untersuchungen können die wesentlichen neuen Erkenntnisse der Arbeit wie folgt formuliert werden: Berücksichtigt man nur das Verhalten der Verlustraten (Paketfehlerraten), kann die Einstellung des Fehlerschutzes von der Einbeziehung der Überlastverluste der Warteschlangen entkoppelt werden, da kein lokales Optimum zwischen den Lastverlusten und den Übertragungsverlusten ermittelt werden konnte. Eine optimale Einstellung ergibt sich laut den durchgeführten Untersuchungen immer dann, wenn die Verluste der physikalischen Übertragung minimiert werden können, unabhängig davon, welche Übertragungslast anliegt. Dabei kann eine qualitative Deckung der Ergebnisse der analytischen Betrachtungen mit den Ergebnissen der durchgeführten Simulationen nachgewiesen werden. Die Tatsache der Unabhängigkeit der Fehlerschutzeinstellung von der Lastsituation hat grundlegende Auswirkungen auf die Vergabe des Fehlerschutzes bei einer mehrklassigen Übertragung. Es ergibt sich nicht mehr die Notwendigkeit, wie im RTRA Verfahren vorgeschlagen, eine klassenbezogene Vergabe des Fehlerschutzes durchzuführen. Vielmehr kann ein stark vereinfachter Algorithmus zur einheitlichen Fehlerschutzeinstellung für alle Klassen verwendet werden. Eine Differenzierung zwischen den einzelnen Klassen wird dabei durch das eingesetzte Scheduling erreicht. Hier zeigt sich insbesondere eine sehr gute Kombination des neuen Einstellverfahrens mit einem MAC Scheduler. Durch weitere Untersuchungen können die erreichten Ergebnisse weiter untermauert werden. Insbesondere können zukünftige Arbeiten verschiedene Verkehrsklassen einbeziehen, um festzustellen, ob auch für diese die formulierten Aussagen ihre Gültigkeit behalten. Für das Einstellverfahren können weiterhin neue Metriken einbezogen werden. Hier stellt insbesondere die Berücksichtigung von Verzögerungswerten einen wichtigen und praxisrelevanten Ansatz dar.



## 5 Leistungsbewertung des neuen Verfahrens

### 5.1 Einleitung

Obwohl die grundlegende Funktionalität des neuen SORA-Einstellverfahrens für den Fehlerschutz bereits gezeigt werden konnte, ist eine umfassende Leistungsbewertung erforderlich, um das Verfahren in verschiedensten Einsatzfällen zu verifizieren. Es ist dabei qualitativ und quantitativ nachzuweisen, wie die Zielsetzung der Arbeit, die in der Erhöhung der Robustheit der Übertragung des Base Layers liegt, durch das neue SORA-Verfahren erreicht und im Vergleich zu bestehenden Verfahren verbessert werden kann. Das vorliegende Kapitel stellt die Methoden und die erzielten Ergebnisse der durchgeführten Leistungsbewertung dar. Weiterhin werden diese Ergebnisse diskutiert und deren Bedeutung wird interpretiert. Die Leistungsbewertung erfolgt durch simulative Testreihen wobei die Simulationsumgebung nach Anhang A.3 verwendet wird. Es werden dabei drei verschiedene Arten von Verifikationstests durchgeführt:

- **Verhalten auf der Netzebene:** Hierbei wird die Bewertung der netzspezifischen Parameter vorgenommen wobei der besondere Fokus auf den erreichbaren Paketfehlerraten liegt. Diese Betrachtung soll einer Vorqualifizierung und Abschätzung der Eignung für die Videoebene dienen.
- **Verhalten auf der Videoebene:** Dabei werden komplette Videoübertragungen simuliert und es werden die erreichbaren Videokriterien bewertet. Zur Auswertung werden die in den Abschnitten 2.3 und 2.4 definierten Anforderungen und Bewertungskriterien für die Videoebene eingesetzt.
- **Verhalten auf der Videoebene in extremen Situationen:** Zu den besonderen Situationen zählen vor allem Übertragungen bei steigenden Entfernungen zwischen Sender und Empfänger, die zu hohen Paketfehlerraten führen. Diese werden im Rahmen einer eigenen Testreihe ausgewertet.

Das neue SORA-Verfahren wird anhand von Referenzverfahren vergleichend bewertet. Als Referenzverfahren für einen direkten Vergleich dienen die im Kapitel 3.3.1 vorgestellten Verfahren: Standardeinstellung nach IEEE 802.11e [35] sowie das RTRA Verfahren nach [64]. Die für die Netz- und die Videoebene verwendeten Methoden werden einleitend beschrieben und erläutert. Die durchgeführten Testreihen werden zunächst auf der Netz- und auf der Videoebene einzeln bewertet. In einer abschließenden Gesamtbewertung wird eine zusammenfassende Einschätzung der vorgeschlagenen Architektur und des neuen SORA-Verfahrens hinsichtlich der Erreichung der Zielsetzung der Arbeit gegeben.

## **5.2 Simulationsumgebung für die Leistungsbewertung**

Zur Durchführung der Leistungsbewertung wurde im Rahmen der Arbeit eine softwarebasierte Simulationsumgebung implementiert, wie sie in der Abbildung 5.1 in einer Übersicht dargestellt ist. Diese wird sowohl für die Simulationen auf der Netz- als auch auf der Videoebene verwendet. Von daher ist es erforderlich, die gesamte Übertragungskette hier abzubilden. Die Simulationsumgebung besteht von daher aus drei wesentlichen Komponenten: dem Videoencoder, dem Videodecoder sowie dem Netzsimulator. Der Videoencoder liest eine als Datei abgelegte digitale Videosequenz und codiert diese in einen skalierbaren Videobitstrom. Der Videodecoder verwendet diesen Bitstrom, um daraus wieder eine uncodierte digitale Videosequenz zu erstellen. Zur Realisierung von Videoencoder und -decoder wird auf eine Referenzimplementierung des Standards H.264 SVC zurückgegriffen, die als Sourcecode verfügbar ist [110]. Die Netzsimulation bildet die Übertragung der Videobitströme in einem drahtlosen lokalen Netzwerk ab. Dabei werden für die Untersuchungen der WLAN Standard IEEE 802.11 und die QoS-Erweiterung IEEE 802.11e verwendet. Die Realisierung der Netzsimulation basiert auf dem Netzwerksimulator ns-2. Für die Umsetzung des verwendeten Standards beziehungsweise der Standarderweiterungen mussten an dem Netzwerksimulator einige Erweiterungen vorgenommen werden. Dies betrifft vor allem die Realisierung der mehrklassigen priorisierten Übertragung, wie sie in der Referenzarchitektur spezifiziert wurde, aber auch Erweiterungen für eine verbesserte Simulation der physikalischen Übertragung. Zur Integration der kompletten Simulation der gesamten Übertragungskette war es weiterhin erforderlich, entsprechende Datenschnittstellen zwischen den einzelnen Software-komponenten zu implementieren, da diese zum Stand der Technik noch nicht zusammenarbeiten konnten. Weitere Implementierungen betreffen vor allem



Softwarekomponenten zur Erfassung und Auswertung der relevanten Parameter und Werte. Eine detaillierte Beschreibung der Simulationsumgebung befindet sich im Anhang A.3.

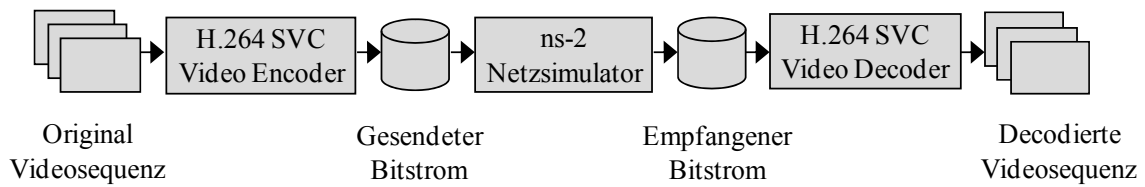


Abbildung 5.1: Schematischer Aufbau der Simulationsumgebung

## 5.3 Verhalten auf der Netzebene

### 5.3.1 Beschreibung der Testmethodik

Die Leistungsbewertung auf der Netzebene dient zu einer ersten grundlegenden Einschätzung und Vorqualifizierung des Verfahrens ohne Einbeziehung einer Videoapplikation. Es soll dabei ermittelt werden, ob sich die Anforderungen auf der Netzebene, wie sie im Abschnitt 2.3 definiert werden, durch das neue Verfahren erreichen lassen. Die Erfüllung dieser Anforderungen stellt eine notwendige aber nicht hinreichende Bedingung für die Erfüllung der Anforderungen auf der Videoebene dar. Das primäre Qualitätskriterium für die Bewertung auf der Netzebene ist das Verhalten der Paketfehlerraten der einzelnen Prioritätsklassen, wobei insbesondere die Klasse mit der höchsten Priorität von besonderem Interesse ist, da sie im Wesentlichen für die erreichbare Robustheit relevant ist. Als primäre Eingangsparameter werden die verwendete Nutzlast sowie die Entfernung zwischen Sender und Empfänger verwendet. Davon ausgehend werden zwei grundlegende Arten von Tests definiert, die für eine Verifikation der Funktionsweise des SORA-Verfahrens erforderlich sind: der Test des Fehlerverhaltens durch Variation der Entfernung bei konstanter Last sowie der Test des Lastverhaltens durch Variation der Last bei konstanter Entfernung. Als weitere variierbare Einstellkriterien werden die Topologie als single-hop oder multi-hop Netz sowie eine mögliche Hintergrundlast berücksichtigt. Im Folgenden werden die einzelnen Parametrierungen der Einstellkriterien beschrieben.

**Entfernung zwischen Sender und Empfänger.** Bei der Untersuchung des Fehlerverhaltens wird die Entfernung zwischen Sender und Empfänger in einem definierten Bereich variiert. Bei der multi-hop Übertragung wird die Entfernung jeweils zwischen zwei Knoten angegeben. Somit ergibt sich die insgesamt überbrückte Distanz aus der angegebenen Entfernung und der Anzahl der Hops. Verwendet werden Entfernungen

zwischen 20m und 50m bei single-hop Übertragung sowie zwischen 10m und 30m bei multi-hop Übertragung.

**Lastverhalten der sendenden Stationen.** Bei der Untersuchung des Lastverhaltens wird die Last der sendenden Stationen variiert. Dabei wird die Verteilung der Verkehrslast auf die einzelnen Prioritätsklassen berücksichtigt. Demnach lassen sich zwei Arten von Lasttests unterscheiden. Bei symmetrischer Last erfolgt eine Gleichverteilung auf alle Klassen. Bei asymmetrischer Last wird die Last nach einem Schlüssel auf die einzelnen Klassen verteilt.

**Hintergrundlast im Netz.** Durch die Hintergrundlast im Netz wird das Vorhandensein weiterer sendender Stationen in dem drahtlosen Netz nachgebildet. Hintergrundlast wird bei einigen Tests hinzugenommen, um hierbei Unterscheidungen gegenüber dem Verhalten ohne zusätzlicher Verkehrslast festzustellen. Bei der Hinzunahme von Hintergrundlast werden einheitlich 4x512kBit/s symmetrisch aufgeteilt auf die einzelnen Verkehrsklassen verwendet.

**Netztopologie.** Bei der Netztopologie werden die Varianten single-hop Verbindung (Single) und multi-hop Verbindung (Multi) unterschieden. Bei der single-hop Verbindung geht der untersuchte Datenstrom direkt vom Sender zum Empfänger ohne, dass eine zusätzliche Station zwischengeschaltet ist. Bei einer multi-hop Verbindung geht der Datenstrom über einen zusätzlichen Knoten im Netz. Aus der Kombination der verschiedenen Einstellkriterien werden 8 Testreihen für das Fehlverhalten und 16 Testreihen für das Lastverhalten abgeleitet. Die Konfiguration der einzelnen Testreihen ist in Anhang A.4 aufgelistet. Jede Testreihe dient dem Vergleich der drei Verfahren Standard, RTRA und SORA. Die Auswertung der Testreihen erfolgt nach der im Abschnitt 2.4.2 definierten Methodik. Von den dort aufgeführten Kriterien werden für eine quantitative Bewertung die Robustheit und die Maximalleistung ausgewählt. Die Bewertung der Robustheit dient dazu, nachzuweisen, inwieweit die angestrebten Verbesserungen durch das SORA-Verfahren erreicht werden können. Bei der Maximalleistung wird die Gesamtleistung der Verfahren über alle betrachteten Klassen bewertet. Hier sollte das neue SORA-Verfahren keine Verschlechterung bringen. Auf Basis von Maximalleistung und Robustheit wird die Skalierung qualitativ diskutiert. Die Beurteilung des neuen SORA-Verfahrens im Vergleich zu den ausgewählten Referenzverfahren erfolgt durch eine qualitative Einschätzung nach vorgegebenen Vergleichsgraden, wie sie in der Tabelle 5-1 vorgestellt werden.

Ergebnis	Stark verbessert	Verbessert	Gleich	Verschlechtert	Stark verschlechtert
Bewertung	++	+	O	-	--

Tabelle 5-1: Vergleichsgrade zur Auswertung der Testreihen der Netzebene

Die Durchführung der Auswertung wird in der Abbildung 5.2 und der Tabelle 5-2 an einem Beispiel verdeutlicht. Entsprechend der Formel (2-15) wird eine maximal akzeptable Verlustrate von  $\varepsilon = 0,1$  festgelegt. Für jedes Verfahren werden in dem untersuchten Bereich die Werte für die Maximalleistung  $x_{\max}$  (Übertragung aller Klassen) und die Robustheit  $x_{\min}$  (Übertragung mindestens einer Klasse) aufgezeichnet. Die erhaltenen Ergebnisse werden qualitativ bewertet.

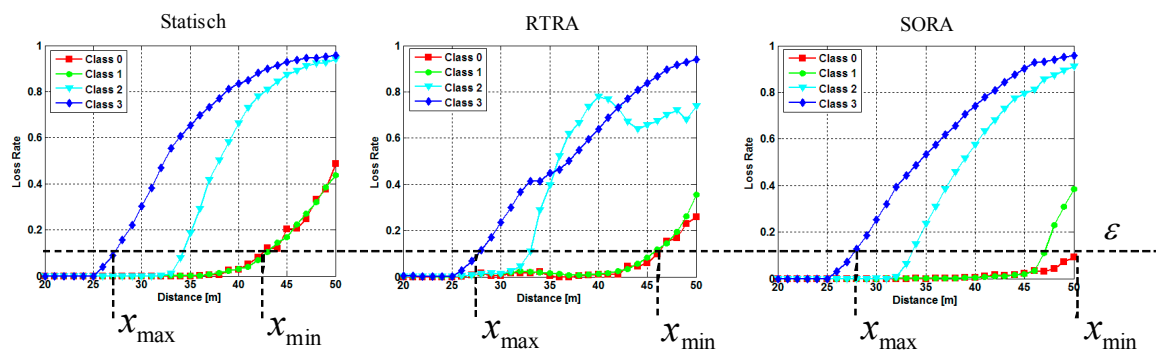


Abbildung 5.2: Beispielhafte Auswertung eines Tests

Werte für $\varepsilon = 0,1$	Standard	RTRA	SORA	SORA/ Standard	SORA/ RTRA
Maximalleistung	27m	27m	27m	O	O
Robustheit	42m	46m	50m	++	+

Tabelle 5-2: Beispielhafte Ergebnisse für einen Einzeltest

### 5.3.2 Ergebnisse für das Fehlerverhalten

In der Testreihe für das Fehlerverhalten werden die Verfahren in einem definierten Entfernungsbereich bei festen Lastwerten simuliert. Die Parametrierung der Einzeltests ist

im Anhang A.4.1 enthalten. Die erreichten Einzelergebnisse für die Robustheit und die Maximalleistung sind in Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4 enthalten.

Test	01	02	03	04	05	06	07	08
<b>Standard</b>	42m	41m	22m	20m	41m	37m	21m	18m
<b>RTRA</b>	45m	40m	23m	20m	40m	35m	21m	18m
<b>SORA</b>	48m	43m	26m	22m	42m	38m	22m	18m
<b>SORA-Standard</b>	++	+	++	+	+	+	O	O
<b>SORA-RTRA</b>	+	+	+	+	+	+	O	O

Tabelle 5-3: Ergebnisse für die Robustheit

Test	01	02	03	04	05	06	07	08
<b>Standard</b>	37m	29m	17m	15m	29m	<20m	14m	<10m
<b>RTRA</b>	37m	30m	17m	14m	29m	<20m	15m	<10m
<b>SORA</b>	37m	29m	17m	15m	29m	<20m	15m	<10m
<b>SORA-Standard</b>	O	O	O	O	O	O	O	O
<b>SORA-RTRA</b>	O	O	O	O	O	O	O	O

Tabelle 5-4: Ergebnisse für die Maximalleistung

In der Leistungsbewertung konnte herausgestellt werden, dass eine Verbesserung der Robustheit durch das neue SORA-Verfahren erreichbar ist. Dies zeigt sich vor allem in den Testreihen 1 bis 6 und gilt hier gegenüber beiden verwendeten Referenzverfahren. Eine

Ausnahme bilden die Tests 07 und 08. In diesen Szenarien ist das Verlustverhalten im Wesentlichen durch einen hohen Anteil von Überlastverlusten bei gleichzeitig hohen Übertragungsverlusten geprägt. In dieser Extremsituation sind keine Verbesserungen der Robustheit möglich. Hier sind alle verglichenen Ansätze überfordert. Bei der Maximalqualität verhalten sich alle untersuchten Verfahren gleich. Das zeigt, dass durch das SORA-Verfahren hier keine negative Beeinflussung bei gleichzeitiger verbesserter Robustheit zu erwarten ist. Aus der gleichen Maximalleistung der Verfahren ergibt sich bei der Skalierung eine Verbesserung immer dann, wenn auch eine höhere Robustheit vorliegt.

### 5.3.3 Ergebnisse für das Lastverhalten

In der Testreihe des Lastverhaltens werden die Verfahren in einem definierten Lastbereich bei festen Sender-Empfänger Entfernungen simuliert. Dabei ist eine symmetrische Verteilung der Verkehrslast auf alle Klassen eingestellt. Die Parametrierung der Einzeltests erfolgt anhand der Angaben im Anhang A.4.2. Die erreichten Einzelergebnisse für die Robustheit und die Maximalleistung sind in Tabelle 5-5 und Tabelle 5-6 enthalten.

Test	01	02	03	04	05	06	07	08
<b>Standard</b>	>2048	>2048	1376	672	>2048	>2048	1664	<512
<b>RTRA</b>	>2048	>2048	1088	512	>2048	1728	1216	<512
<b>SORA</b>	>2048	>2048	1408	768	>2048	>2048	1632	<512
<b>SORA-Standard</b>	O	O	+	+	O	O	-	O
<b>SORA-RTRA</b>	O	O	++	++	O	+	+	O

Tabelle 5-5: Ergebnisse für die Robustheit (in kbit/s)

Bei der Robustheit ergeben sich Verbesserungen in erster Linie gegenüber dem RTRA Verfahren und hierbei insbesondere bei der multi-hop Vernetzung. Dies ist durch die in Abschnitt 3.2.4 beschriebenen Unterschiede in der Architektur der Netzschnittstelle zu begründen. Die beim RTRA-Verfahren eingesetzte Schnittstellenarchitektur basiert auf einem PQ Scheduling-Verfahren. Besonders in den multi-hop Tests (Tests 3 und 4) wirkt sich dieser Ansatz gegenüber dem MAC Scheduling der einzelnen Prioritätsklassen negativ

aus. Auch bei der Maximalleistung ergeben sich in einigen Situationen (Tests 6 und 7) Unterschiede. Neben den Tests mit symmetrischer Last wurde auch eine Testreihe mit asymmetrischer Lastverteilung durchgeführt. Die Parametrierungen sind ebenfalls im Anhang A.4.2 enthalten. Die erreichten Ergebnisse entsprechen qualitativ denen der symmetrischen Lastverteilung. Das heißt, das neue Verfahren bringt hier keine wesentlichen Verbesserungen aber auch keine Verschlechterungen mit sich. Bei der Skalierung ergeben sich Verbesserungen vor allem gegenüber dem RTRA-Verfahren aufgrund der Schnittstellenarchitektur. Dies zeigt sich gleichfalls besonders gut in den Tests 3 und 4.

Test	01	02	03	04	05	06	07	08
<b>Standard</b>	1312	768	<512	<512	992	<512	<512	<512
<b>RTRA</b>	1312	768	<512	<512	992	512	512	<512
<b>SORA</b>	1312	768	<512	<512	992	<512	<512	<512
<b>SORA-Standard</b>	O	O	O	O	O	O	O	O
<b>SORA-RTRA</b>	O	O	O	O	O	+	+	O

Tabelle 5-6: Ergebnisse für die Maximalleistung (in kbit/s)

### 5.3.4 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse und Fazit

Die Durchführung der Testreihen auf der Netzebene dient zur Vorqualifizierung des neuen SORA-Verfahrens für die bessere Eignung der Fehlerschutzeinstellung zur Übertragung skalierbar codierter Videodaten. Bei der Auswertung der Testreihen wird ein Vergleich mit den gewählten Referenzverfahren Standard IEEE 802.11e und RTRA vorgenommen. Als Vergleichsgröße wird die erreichbare Paketverlustrate verwendet. Zur Bewertung kommen die im Abschnitt 2.4 definierten Kriterien zum Einsatz. Ein zusammenfassender Vergleich ist in der Tabelle 5-7 enthalten.

Kriterium	Vergleich IEEE 802.11e		Vergleich RTRA	
	Fehler	Last	Fehler	Last
Robustheit	++	O	+	+
Maximalleistung	O	O	O	+
Skalierung	++	O	+	+

Tabelle 5-7: Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse auf der Netzebene

Bei dem neuen SORA-Verfahren kann durch die Leistungsbewertung auf der Netzebene eine Verbesserung bei der Robustheit nachgewiesen werden. Dies zeigt sich vor allem bei den Testreihen des Fehlerverhaltens und gilt insbesondere im Vergleich zum Standardverfahren nach IEEE 802.11e, das mit einer festen Einstellung des Retry Limits arbeitet. Gegenüber dem RTRA Verfahren kann beim Fehlerverhalten ebenfalls eine Erhöhung des Anwendungsbereiches festgestellt werden. Eng verbunden mit der höheren Robustheit ist eine höhere Skalierung, da bei steigender Robustheit ein größerer Arbeitsbereich zur Verfügung steht. In Extremsituationen, bei denen sich hohe Last und hohe Übertragungsfehler überdecken, kann keines der Verfahren eine ausreichende Robustheit garantieren. Bei der Maximalleistung konnten keine wesentlichen Unterschiede des neuen SORA- Verfahrens gegenüber den Referenzverfahren nachgewiesen werden. Daraus ist zu schließen, dass die erreichbare höhere Robustheit des Base Layers auf der Videoebene keine Verringerung der Gesamtleistung bei guten Empfangsbedingungen nach sich zieht.

Beim Lastverhalten kann gegenüber dem Standardverfahren nach IEEE 802.11e keine wesentliche Änderung festgestellt werden. Das ist auch plausibel, da sich das SORA-Verfahren in Bereichen mit niedrigen Übertragungsfehlern wie das Standardverfahren verhält. Auch beim Lastverhalten sind bei der Maximalleistung keine oder nur geringfügige Änderungen gegenüber den anderen Verfahren zu verzeichnen. Bei der Robustheit treten in einzelnen Fällen Verbesserungen gegenüber dem RTRA Verfahren auf, was den Erwartungen aus den Untersuchungen in Abschnitt 4.4.3 entspricht. Aus den Ergebnissen der Netzebene lässt sich als Fazit für die Videoebene ableiten, dass im Wesentlichen die Robustheit des Base Layers von den Eigenschaften des SORA-Verfahrens profitiert. Dadurch kann eine Vergrößerung des Einsatzbereiches einer Videoanwendung mit minimaler Qualität erreicht werden. Verbesserungen bei der

maximalen Gesamtqualität der Videoübertragung sind dagegen eher nicht zu erwarten, da das neue Verfahren sich bei der Maximalleistung sowohl beim Fehler- als auch beim Lastverhalten vergleichbar zu den Referenzverfahren verhält. Die detaillierte Bewertung auf der Videoebene wird in den folgenden Abschnitten durchgeführt.

## 5.4 Verhalten auf der Videoebene unter Normalbedingungen

### 5.4.1 Testmethodik

Der Verifikationstest auf der Videoebene dient dem Nachweis der Erfüllung der im Abschnitt 2.4 definierten Qualitätskriterien durch das neue Verfahren für die Fehlerschutzeinstellung. Dabei wird bewertet, welche Verbesserungen gegenüber bestehenden Verfahren erreicht werden können. Auch hier gilt das besondere Interesse der erreichbaren Robustheit bei der Übertragung. In einem ersten Schritt wird das Verhalten unter Normalbedingungen, das heißt in einem Bereich mit niedrigen Fehlerraten durchgeführt. Zur Durchführung dieser Tests wird eine Testreihe bestehend aus 42 Einzeltests definiert. Die Einzeltests werden so gewählt, dass der betrachtete Bereich an Netzwerkszenarien bei der Bewertung abgedeckt werden kann. Eine detaillierte Aufstellung der einzelnen Testvarianten befindet sich im Anhang unter A.5.1. Zur Aufstellung der einzelnen Testvarianten werden fünf verschiedene Einstellkriterien herangezogen: die Entfernung zwischen Sender und Empfänger, die Art und Charakteristik der verwendeten Videosequenz, das Vorhandensein von Hintergrundlast im Netz, die Netztopologie sowie die Einstellung des Decoderpuffers. Jedes Einstellkriterium wird mit verschiedenen Parametrierungen zur Abbildung verschiedener Zustände eingestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Parametrierungen beschrieben.

**Entfernung zwischen Sender und Empfänger.** Hierfür werden ausgehend von den Netzuntersuchungen charakteristische Werte in einem Bereich ausgewählt, die einen Betrieb mit mehreren Videolayern erlauben sollten. Verwendet werden Entfernungen zwischen 10m und 40m.

**Arten und Charakteristik der verwendeten Videosequenzen.** Um verschiedene Anforderungen auf der Videoebene abzubilden, werden zwei verschiedene Arten von Videosequenzen mit verschiedenen Parametrierungen verwendet. Eine Übersicht zu den Sequenzen und verwendeten Parametern gibt die Tabelle 5-8.



**Hintergrundlast im Netz.** Durch die Hintergrundlast im Netz wird das Vorhandensein weiterer sendender Stationen in dem drahtlosen Netz nachgebildet. Hintergrundlast wird bei einigen Tests hinzugenommen, um hierbei Unterscheidungen gegenüber dem Verhalten ohne zusätzlicher Verkehrslast festzustellen. Bei der Hinzunahme von Hintergrundlast werden einheitlich 4x1024kBit/s aufgeteilt auf die einzelnen Verkehrsklassen verwendet.

**Netztopologie.** Bei der Netztopologie werden die Varianten single-hop Verbindung (Single) und multi-hop Verbindung (Multi) unterschieden. Bei der single-hop Verbindung geht der untersuchte Datenstrom direkt vom Sender zum Empfänger ohne, dass eine zusätzliche Station zwischengeschaltet ist. Bei einer multi-hop Verbindung geht der Datenstrom über einen zusätzlichen Knoten im Netz.

**Einstellung des Decoderpuffers.** Über den Decoderpuffer können die Schwankungen der Verzögerung bei der Übertragung ausgeglichen werden. Einstellkriterien für den Puffer sind die Puffergröße sowie der initiale Pufferstand, der erreicht werden muss, bevor mit der Decodierung am Empfänger begonnen wird. Hierbei werden für alle Tests einheitliche Einstellungen verwendet. Dabei wird die Puffergröße auf 256 KByte und der initiale Befüllstand auf 5% eingestellt.

Sequenz	Charakteristik	Sequenzparameter	Codierparameter
Paris	Videokonferenz mit 2 Personen und vielen Details	Format: CIF Framerate: 15Hz Frames: 1000	Quantisierung: 45 VBR Mittlere Rate: 4,3 Mbit/s PSNR Encoder: 37,2 dB
Children	Gemischtes natürliches und synthetisches Bildmaterial	Format: CIF Framerate: 15Hz Frames: 1000	Quantisierung: 45 VBR Mittlere Rate: 4,1 Mbit/s PSNR Encoder: 38,3 dB

Tabelle 5-8: Charakteristik und Parametrierung der Videosequenzen

Die Durchführung der Simulationen erfolgt auf der Basis der im Anhang A.3 beschriebenen Simulationsumgebung. Die Auswertung der Testreihen basiert auf den im Abschnitt 2.4 für die Arbeit definierten Bewertungskriterien. Dabei werden insbesondere folgende Größen verwendet:

- Das Robustheitskriterium nach der Formel 2-2

- Das Verzögerungskriterium
- Das Qualitätskriterium nach der Formel 2-3
- Das Qualitätsanpassungskriterium nach der Formel 2-5

Von primärem Interesse ist das Robustheitskriterium, da vor allem die Verbesserung der Robustheit durch das neue SORA-Verfahren auf der Videoebene angestrebt wird und im Rahmen der Leistungsbewertung zu bestätigen ist. Im Zusammenhang mit der erreichbaren Robustheit ist die Verzögerung zu betrachten. Da durch die gesteigerten Übertragungswiederholungen, die das neue Einstellverfahren ermöglicht, eine zusätzliche Verzögerung zu erwarten ist, stellt das Verzögerungskriterium eine Art Kostenkriterium dar. Von daher ist eine kritische Bewertung des Zusammenhanges zwischen erreichbarer Robustheit und der dafür erhöhten Verzögerung erforderlich. Bei der Verzögerung sind dabei zwei verschiedene Arten zu unterscheiden. Zum einen ist die direkte Übertragungsverzögerung (Transmission Delay) auszuwerten, da hier ein direkter Zusammenhang zu den Übertragungswiederholungen besteht. Wichtiger auf der Videoebene ist die durch den Decoderpuffer entstehende Verzögerung beim Abspielen im Empfänger (Playout Delay). Dies beschreibt die Zeit, die am Empfänger gewartet werden muss, bevor mit dem Abspielen einer empfangenen Sequenz begonnen werden kann. Festgelegt wird es durch die Pufferparameter Puffergröße und initialer Befüllstand.

Weiterhin werden aber auch die Qualitätskriterien der Videoebene ausgewertet, da diese eine Bewertung hinsichtlich der gestellten Anforderungen aus Sicht der Videoanwendungen erlauben. Aufgrund der Tatsache, dass der in der für die Leistungsbewertung vorliegenden Implementierung eingesetzte skalierbare H.264 Videodecoder [110] nicht in der Lage ist, Fehler im Base Layer stabil zu verarbeiten, muss für die Bewertung des Qualitäts- und des Qualitätsanpassungskriteriums eine Idealisierung vorgenommen werden. Hierbei wird zur Auswertung dieser Kriterien eine stabile Übertragung des Base Layers angenommen. Dies führt dazu, dass die erreichten Werte dieser Kriterien nicht dem tatsächlich erreichbaren entsprechen. Dies wird jedoch in der Diskussion der Simulationsergebnisse berücksichtigt. Die Bewertung und Diskussion der Ergebnisse erfolgt in zwei Schritten: Zunächst werden die im Mittel erreichbaren Ergebnisse erfasst und diskutiert. Anschließend erfolgt eine Diskussion von Einzelergebnissen im Detail.

### 5.4.2 Bewertung der im Mittel erreichten Ergebnisse

Die bei den Videotestreihen im Mittel erreichten Ergebnisse sind in der Tabelle 5-9 aufgelistet. Anhand der für den Normalbetrieb durchgeführten Testreihen kann bei der Robustheit des Base Layers  $r_f$  im Durchschnitt eine Verbesserung von 1,5 % bei Einsatz des SORA-Verfahrens gegenüber den anderen Verfahren nachgewiesen werden. Bei der Verzögerung im Empfänger beim Abspielen einer empfangenen Videosequenz kann eine geringfügige Verkürzung gegenüber dem Standard um 60ms Sekunden erreicht werden. Gegenüber dem RTRA Verfahren liegt dieser Gewinn mit 500ms sogar um einiges höher. Bei der idealisiert verglichenen Gesamtqualität können nur marginale Unterschiede zwischen den verschiedenen Verfahren festgestellt werden. Allerdings ist auch eine Verbesserung der Qualitätsanpassung beim SORA-Verfahren gegenüber den anderen Verfahren durch Verringerung der Streuung  $\sigma_Q$  um 1-2 dB erkennbar.

Kriterium	Maß	SORA vs. Standard	SORA vs. RTRA
Robustheitskriterium	$r_f$	+ 1,58 %	+ 1,52 %
Verzögerung (Playout)	$\Delta_t$	- 0,06 ms	-0.50 s
Qualitätskriterium	PSNR	+ 0,1305 dB	+ 0,0679 dB
Qualitätsanpassungskriterium	$\sigma_Q$	-1,6029 dB	-2,3851 dB

Tabelle 5-9: Durchschnittliche Ergebnisse der Videoebene unter Normalbedingungen

### 5.4.3 Diskussion der Ergebnisse der Einzeltestreihen

Die Einzelergebnisse für die erreichbare Robustheit  $r_f$  sind in der Abbildung 5.3 dargestellt. Bei allen durchgeführten Tests konnte durch das SORA-Verfahren ein Wert von  $r_{f_{\min}} > 97\%$  erreicht werden. Das bedeutet, dass nur bei weniger als 3% der insgesamt übertragenen Frames des Base Layers nicht decodierbar sind. Dies ist gegenüber den Referenzverfahren ein deutlicher Gewinn, da für das Standardverfahren nur ein Wert von,  $r_{f_{\min}} > 83\%$ , für das RTRA Verfahren ein Wert von  $r_{f_{\min}} > 86\%$  ermittelt werden konnte. Gegenüber dem Standard bedeutet dies eine Steigerung der minimalen Robustheit von 14%. Damit entspricht das Ergebnis der in der Arbeit gesetzten Zielsetzung sehr gut.

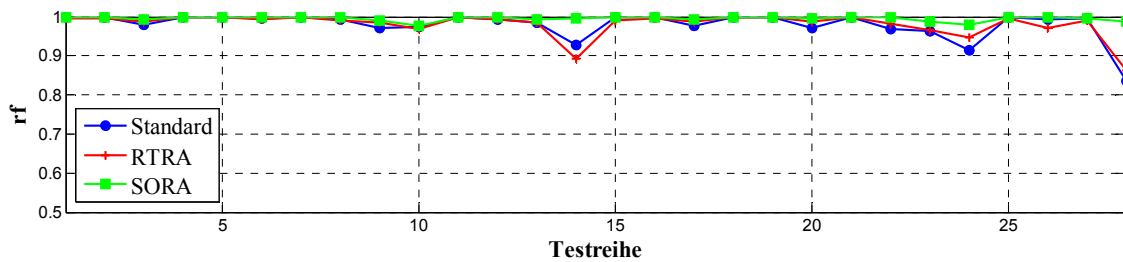


Abbildung 5.3: Robustheitsverteilung der Einzeltestreihen

In der Abbildung 5.4 sind die erreichten Ergebnisse bei der Verzögerung im Empfänger dargestellt. Bei Betrachtung der Ergebnisse des Standards und des SORA-Verfahrens ist ersichtlich, dass beide Verfahren bei verschiedenen Tests die gleichen Delaywerte erreichen und sich nur in einigen Ausnahmen Unterschiede ergeben. Dies resultiert daraus, dass sich das SORA-Verfahren bei guten Übertragungsbedingungen auch wie das Standardverfahren verhält, da es sein minimales Retry Limit der Standardeinstellung anpasst. Nur in wenigen Ausnahmen sind größere Abweichungen des Playout Delays zwischen den einzelnen Verfahren ersichtlich, woraus zu schließen ist, dass sich trotz der adaptiven Erhöhung des Retry Limits keine Verschlechterung bei der Verzögerung im Empfänger ergibt.

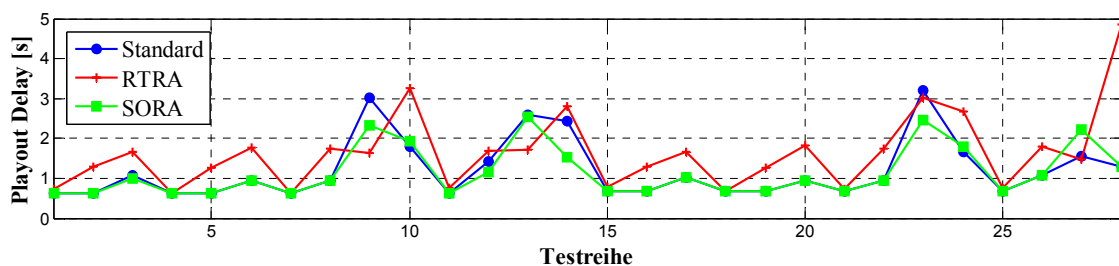


Abbildung 5.4: Verteilung der Verzögerung der Einzeltestreihen

Um die Kosten des neuen SORA-Verfahrens hinsichtlich der Verzögerung genauer darzustellen, ist es notwendig, in die Bewertung auch die Übertragungsverzögerungen mit einfließen zu lassen. Hierbei ist es erforderlich, die Prioritätsklassen, in denen die Video Layer übertragen werden, einzeln zu betrachten, da sich aufgrund der Priorisierung maßgebliche Unterschiede ergeben. Die in den einzelnen Testreihen erfassten Werte bei der Übertragungsverzögerung sind in der Abbildung 5.5 gegenübergestellt. Einen großen Unterschied gibt es zwischen den Klassen des Base Layers (BL) und des Enhancement

Layers 1 (EL1) auf der einen Seite sowie des Enhancement Layers 2 (EL2) und des Enhancement Layers 3 (EL3) auf der anderen Seite. Dies resultiert aus den verwendeten Standardeinstellungen des MAC-Verfahrens nach IEEE 802.11e, die für die Testreihen verwendet wurden. Es ist ersichtlich, dass für den Base Layer bei allen Verfahren Verzögerungswerte erreicht werden, die in jeder Testreihe unter 20ms liegen. Das heißt die beim SORA-Verfahren teilweise hochgeregelte Anzahl der erlaubten Übertragungswiederholungen fällt hier nicht stark ins Gewicht. Ähnlich verhält es sich beim Enhancement Layer 1, wobei sich hier Werte bis zu 90 ms ergeben, was auch noch akzeptabel ist. Bei der niederpriorigen Enhancement Layer 2 und 3 ergeben sich starke Unterschiede bei den Verzögerungswerten. Während die Werte bei einigen Tests auch deutlich unter 1 s liegen, treten teilweise auch Werte von mehreren Sekunden auf. Hieraus zeigt sich deutlich die Differenzierung der einzelnen Klassen in Abhängigkeit von der Netzsituation. Sichtbar ist auch, dass die Übertragungsverzögerungen des SORA-Verfahrens insbesondere beim Enhancement Layer 3 über denen der anderen Verfahren liegen. Das resultiert daraus, dass sich hier eine hohe Anzahl an Übertragungswiederholungen sehr stark auf die Verzögerung auswirkt (zum Beispiel bei den Tests 10 und 14). In solchen Situationen kann der Layer nicht mehr verwendet werden. Das RTRA-Verfahren liefert hier einen besseren Wert, allerdings auf Kosten der Robustheit des Base Layers.

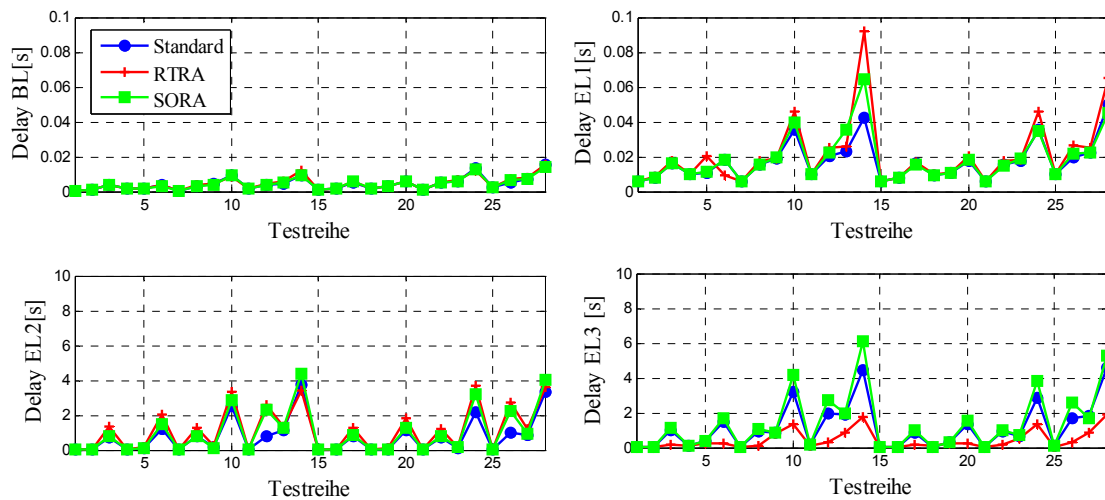


Abbildung 5.5: Übertragungsverzögerungen der Prioritätsklassen

Die Einzelergebnisse für das PSNR sowie  $\sigma_Q$  sind in Abbildung 5.6 und Abbildung 5.7 dargestellt. Beim PSNR kann in fast allen Testfällen ein annähernd gleiches Verhalten aller betrachteten Verfahren festgestellt werden. Wie bereits beschreiben, ist hier nur eine idealisierte Betrachtung bei robustem Base Layer möglich. Da kein maßgeblicher

Unterschied der Werte zu beobachten ist, ist davon auszugehen, dass das neue Verfahren bei der Gesamtqualität hier auch keine negativen Einflüsse hervorruft. Bei den als  $\sigma_Q$  gemessenen Qualitätsschwankungen sind einige Unterschiede feststellbar. Wie bereits gezeigt, ist hier im Mittel eine Verringerung durch Einsatz des neuen Verfahrens erkennbar. Bei den Einzelwerten zeigt sich, dass sich die Differenzen zwischen den Verfahren je nach Einzelfall unterscheiden können. Generell ist eine Abhängigkeit der Qualitätsschwankungen vom Charakter der Sequenz beschreibbar. Dies ist aus den Unterschieden der Tests 1 bis 14 (Sequenz Paris) und der Tests 15 bis 28 (Sequenz Children) ersichtlich. Beim Vergleich der Verfahren untereinander zeigt sich, dass beim Einsatz des SORA-Verfahrens in den meisten Fällen die geringsten Schwankungen erreicht werden können. Der Grund hierfür ist die Eigenschaft des SORA-Verfahrens, immer die höherpriorien Layer stabiler zu übertragen, da der Fehlerschutz für alle Layer gleich vergeben wird und die Priorisierung durch das Queueing erfolgt. Diese Eigenschaft wirkt sich positiv auf die Reduzierung der Qualitätsschwankungen aus.

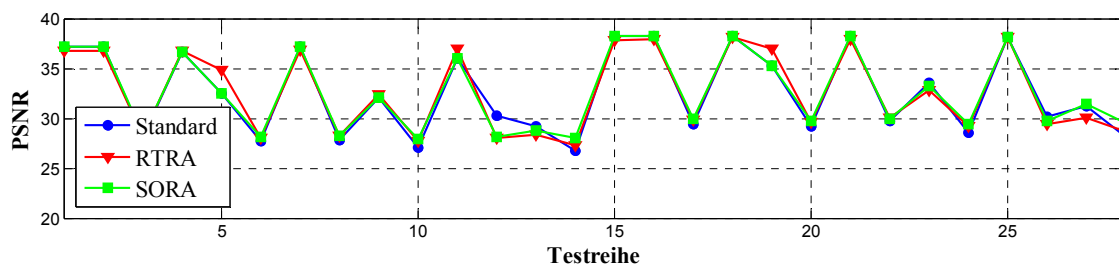


Abbildung 5.6: PSNR Verteilung der Einzeltestreihen

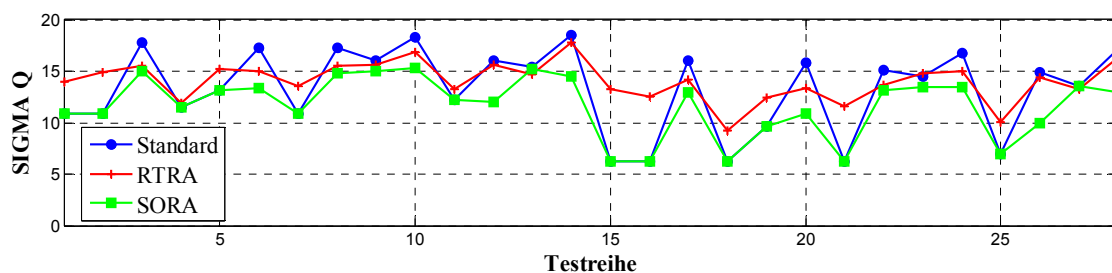


Abbildung 5.7:  $\sigma_Q$ -Verteilung der Einzeltestreihen

#### 5.4.4 Zusammenfassung und Fazit

In den Testreihen konnte gezeigt werden, dass das Ziel, eine höhere Robustheit des Base Layers abzusichern, mit dem neuen SORA-Verfahren erreicht werden kann. Während die Unterschiede im Mittel bei 1,5% liegen, lässt sich beim Erreichen einer minimalen Robustheit eine Verbesserung von bis zu 14% nachweisen. Die Kosten ergeben sich in einer Steigerung der Übertragungsverzögerung in den niederprioren Klassen, was dazu führen kann, dass die Video Layer in diesen Klassen nicht mehr für die Decodierung verwendet werden können. Allerdings ist aufgrund der hierarchischen Abhängigkeit zwischen den Video Layern bei der qualitätsskalierbaren Videocodierung die Robustheit der hochprioren Layer der Verzögerung der niederprioren Layer vorzuziehen.

Bei den Qualitätswerten PSNR und  $\sigma_Q$  sind nur geringfügige Unterschiede zu den anderen Verfahren zu verzeichnen, wobei anzumerken ist, dass hierfür als idealisierte Randbedingung ein robuster Base Layer angenommen werden musste. Bei einer Gesamtbetrachtung aus Robustheit und Qualität ist abzuschätzen, dass das SORA-Verfahren hier noch wesentlich besser abschneiden würde, da die anderen Verfahren größere Qualitätseinbrüche aufgrund fehlerhafter Base Layer Frames erleiden. Um weitere Aussagen zur Leistungsfähigkeit des SORA-Verfahrens zu machen, ist auch eine Untersuchung von Extremsituationen, das heißt bei einer weiteren Steigerung der Entfernung, sinnvoll, wie sie im folgenden Abschnitt vorgestellt wird.

### 5.5 Verhalten auf der Videoebene in Extremsituationen

#### 5.5.1 Testmethodik

Für die Videotests in Extremsituationen wird die gleiche Testmethodik verwendet, wie sie im Abschnitt 5.4.1 beschrieben wird. Die Einstellung der Entfernung wird auf 43m geändert. Dies entspricht einer Situation mit erhöhten Übertragungsfehlern. Die detaillierte Aufstellung der Tests in Extremsituationen befindet sich im Anhang A.5.2.

#### 5.5.2 Bewertung der im Mittel erreichten Ergebnisse

Die bei den Videotestreihen in der Extremsituation im Mittel erreichten Ergebnisse sind in der Tabelle 5-10 dargestellt. Bemerkenswert ist, dass das neue SORA-Verfahren in dieser Situation bei allen ausgewerteten Kriterien eine Verbesserung erzielen kann. Besonders deutlich zeigen sich Unterschiede bei der Robustheit des Base Layers gegenüber den

Vergleichsverfahren. Hier sind im Mittel Verbesserungen bis zu 13% im Vergleich zum Standard möglich. Dabei kann im Schnitt gleichzeitig das Playout Delays um bis zu 2 s reduziert werden. Bei der Gesamtqualität nach PSNR ist eine Verbesserung um etwa 1 dB möglich, bei den Qualitätsschwankungen bis zu 2 dB. Die Übertragungsverzögerung kann im Mittel ebenfalls verringert werden.

Kriterium	Maß	SORA vs. Standard	SORA vs. RTRA
Robustheitskriterium	$r_f$	+13,58 %	+10,71 %
Verzögerung (Playout)	$\Delta_t$	-1,2 s	-2,0 s
Qualitätskriterium	PSNR	+ 1,9 dB	+ 1,0 dB
Qualitätsanpassungskriterium	$\sigma_Q$	-4,4 dB	-3,9 dB

Tabelle 5-10: Ergebnisse der Videoebene in Extremsituationen

### 5.5.3 Diskussion der Ergebnisse der Einzeltestreihen

Die Ergebnisse für die erreichbare Robustheit  $r_f$  in den Extremsituationen sind in der Abbildung 5.8 dargestellt.

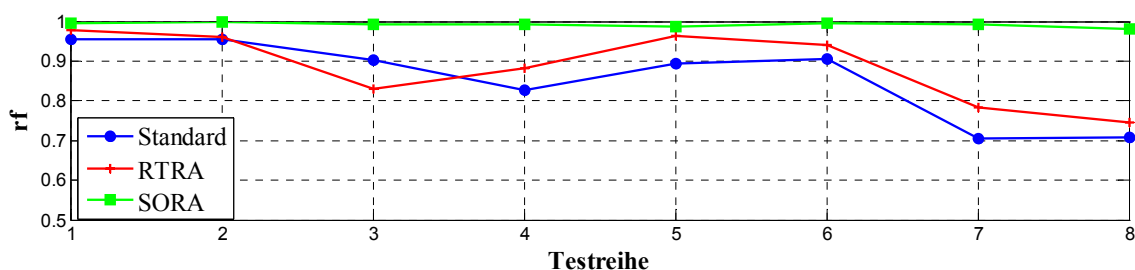


Abbildung 5.8: Robustheitsverteilung der Einzeltestreihen

Das SORA-Verfahren kann auch in der untersuchten Extremsituation in allen durchgeführten Tests einen Wert von  $r_f > 97\%$  einhalten. Dadurch hebt es sich hier deutlich von den anderen Referenzverfahren ab, die nur Werte von  $r_f > 70\%$  erreichen. Damit kann gezeigt werden, dass durch das SORA-Verfahren eine Vergrößerung des



Anwendungsbereiches der Videoanwendungen erreicht werden kann. Die Abbildung 5.9 zeigt die erreichten Ergebnisse beim Playout Delay. Hier liegt das SORA-Verfahren bei der Mehrzahl der Tests in der Größenordnung der Referenzverfahren und schneidet auch in allen Tests noch besser ab, als die anderen Verfahren. Dies kommt dadurch, da durch das robuste SORA-Verfahren die initiale Pufferbefüllung am Empfänger am schnellsten erreicht wird und so am ehesten mit dem Abspielen begonnen werden kann. Insgesamt liegen die Verzögerungen bei allen Verfahren erwartungsgemäß höher als beim Normalbetrieb, da jeweils mehr Übertragungswiederholungen benötigt werden. Dadurch ergeben sich höhere Schwankungen, was zu einem höheren Playout Delay führt.

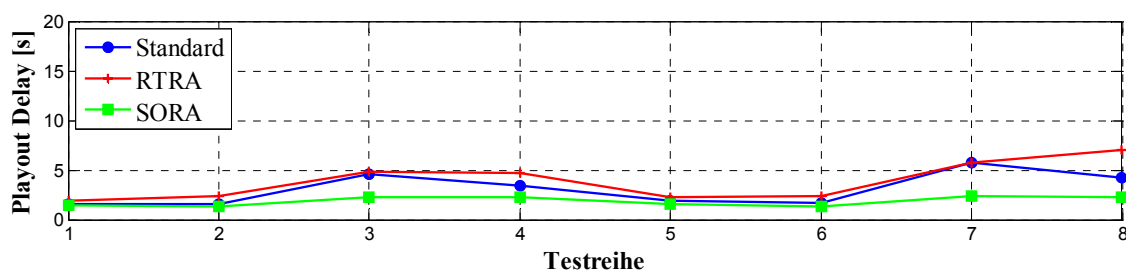


Abbildung 5.9: Verteilung der Verzögerung der Einzeltestreihen

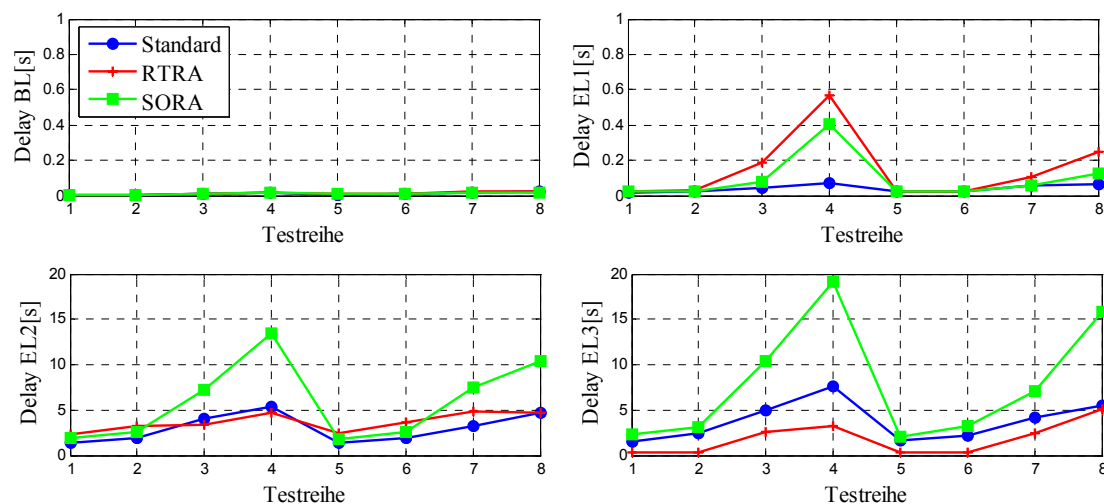


Abbildung 5.10: Übertragungsverzögerungen der Prioritätsklassen

Die Kosten der erhöhten Robustheit beim SORA-Verfahren liegen dennoch in der Verzögerung. Dies ist deutlich aus der auch hier durchgeführten Auswertung der Übertragungsverzögerungen der einzelnen Prioritätsklassen, in denen die Video Layer übertragen werden, ersichtlich. Die erreichten Ergebnisse sind in der Abbildung 5.10

dargestellt. In der höchsten Prioritätsklasse, in der der Base Layer übertragen wird, zeigt sich auch hier, dass die Übertragungsverzögerung keine großen Auswirkungen auf die Gesamtverzögerung hat, da sie relativ gering. Alle Verfahren liegen hier bei Verzögerungen unter 100 ms.

Größere Differenzen zwischen den einzelnen Verfahren aber auch im Vergleich zum Normalbetrieb zeigen sich bei den Enhancement Layern. Hier können jetzt durch die Verdrängung der niedriger priorisierten Klassen größere Verzögerungen im Sekundenbereich auftreten. Dadurch können insbesondere die Enhancement Layer 2 und 3 nicht mehr für die Decodierung am Empfänger verwendet werden, da sie nicht mehr akzeptable Verzögerungswerte aufweisen. In diesen Bereichen schneidet das SORA-Verfahren schlechter ab, das heißt, es verfügt über die höchsten Verzögerungswerte. Da es aber in dieser Extremsituation besser ist, die Robustheit des Base Layers der Verzögerung der Enhancement Layer vorzuziehen, ist es letztendlich ein gewünschtes Verhalten. So kann beim Einsatz des SORA-Verfahrens auch hier immer noch eine Videodecodierung mit akzeptabler, wenn auch niedriger Qualität stattfinden. Die Ergebnisse für die Gesamtqualität und die Qualitätsschwankungen sind in der Abbildung 5.11 und der Abbildung 5.12 dargestellt. Unter Berücksichtigung der Idealisierung entspricht das Ergebnis den Erwartungen. Das heißt, es sind keine wesentlichen Unterschiede zu den anderen Verfahren. Bei der Qualität können auch in der idealisierten Betrachtung Verbesserungen bis zu 2dB erreicht werden, bei den Qualitätsschwankungen bis zu 4dB. Zur Bewertung dieser Ergebnisse gelten die Aussagen aus Abschnitt 5.4, das heißt, für eine Gesamtbewertungen müssen die Ergebnisse von Robustheit und der Qualitätsparameter überlagert betrachtet werden, wobei das SORA-Verfahren immer durch seine hohe Robustheit besser abschneiden würde.

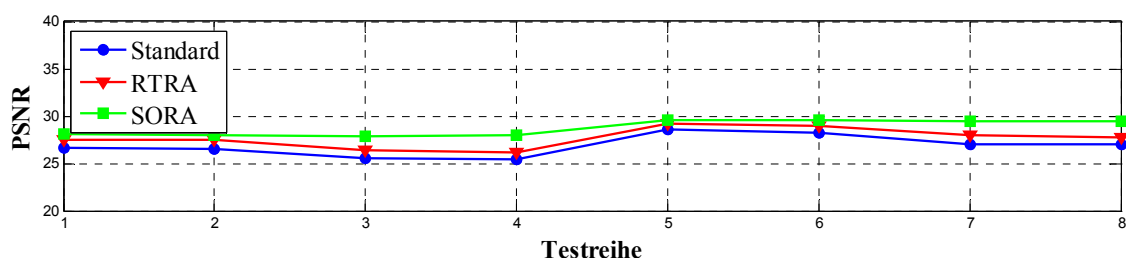
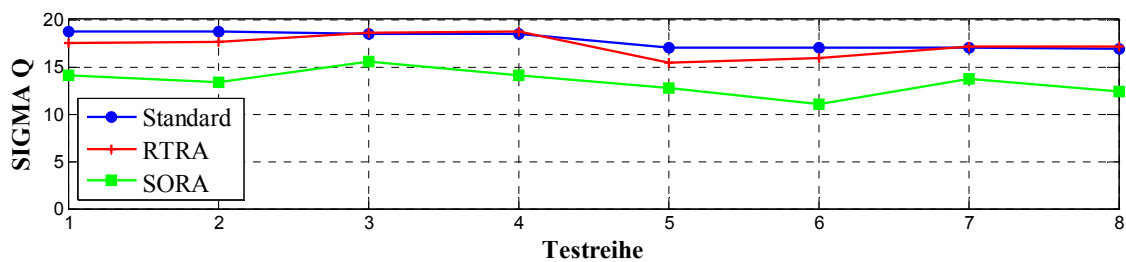


Abbildung 5.11: PSNR Verteilung der Einzeltestreihen

Abbildung 5.12:  $\sigma_Q$ -Verteilung der Einzeltestreihen

### 5.5.4 Zusammenfassung und Fazit

Das neue SORA-Verfahren zeigt in der Extremsituation einer hohen Entfernung besondere Vorteile bei der Erreichung einer robusten Übertragung des Base Layers. Die Kosten liegen dabei in höheren Übertragungsverzögerungen der Klassen mit niedriger Priorität, was aber akzeptabel ist, da in der Extremsituation die Robustheit des Base Layers dem vorzuziehen ist. Das so gezeigte Verhalten des SORA-Verfahrens lässt auf die Fähigkeit schließen, den Anwendungsbereich von skalierbaren Videoanwendungen durch Absicherung einer minimalen Qualität zu vergrößern. Für die erzielten Werte von PSNR und  $\sigma_Q$  gelten prinzipiell die gleichen Aussagen wie im Abschnitt 5.4.4.

## 5.6 Bewertung hinsichtlich der Anwendungsanforderungen

Die Anwendungsanforderungen für die Videoebene wurden im Abschnitt 2.3 erfasst und beschrieben. Demnach ergeben sich für eine qualitative Videoübertragung erforderliche Werte für Verlustraten von kleiner als 5%, d.h. die Robustheit der Übertragung muss für den Base Layer Werte größer 95% erreichen. Die Verzögerung muss dabei für Videostreaminganwendungen bei 2-5s liegen. Bei der Videoqualität müssen für gute Qualität PSNR-Werte erreicht werden, die über 30 dB liegen. Die Akzeptanzgrenze ist hier bei 25 dB zu ziehen. Die erreichten Ergebnisse der Simulationen sind neben dem direkten Vergleich der Verfahren untereinander auch an diesen Anforderungskriterien zu messen. Dabei können folgende Schlüsse gezogen werden.

**Verlustraten.** Hier zeigt sich unter Normalbetrieb deutlich, dass das SORA-Verfahren, das einzige der verglichenen Verfahren ist, das bei allen Tests dieses Kriterium erfüllen kann, da es eine minimale Robustheit von  $r_{f_{\min}} > 96\%$  erreicht. Die anderen Verfahren liegen in

einigen der Tests darunter. Auch in der untersuchten Extremsituation kann das SORA-Verfahren als Einziges diesen Wert einhalten.

**Übertragungsverzögerung.** Durch Einsatz des SORA-Verfahrens ergibt sich zumindest gegenüber dem Standardverfahren eine Erhöhung der Übertragungsverzögerung. Allerdings zeigt sich aus den Testergebnissen, dass im Normalbetrieb und in Extremsituationen in allen Tests eine Übertragungsverzögerung von  $\Delta_t < 5s$  erreicht werden kann. In 85% der Testfälle des Normalbetriebs liegt die Übertragungsverzögerung auch unter den für gute Qualität geforderten 2s. Damit ist das SORA-Verfahren für den Einsatz bei robustem Videostreaming geeignet.

**Videoqualität.** Da die Werte im Rahmen der Leistungsbewertung nur idealisiert betrachtet werden konnten, besitzen sie nicht eine so hohe Aussagekraft, wie die der vorangegangenen Parameter. Im Normalbetrieb kann bei den idealisierten Werten in allen Fällen eine akzeptable Qualität von 25 dB erzielt werden wogegen nur in 60% der Testfälle von größer als 30 dB erreicht wird. Würde man diese Betrachtung unter realistischen Werten durchführen, das heißt unter Einbeziehung einer realen Verlustrate bei den Base Layer Frames, sind Werte zu erwarten, die unter den PSNR-Werten der idealisierten Betrachtung liegen. In Extremsituationen kann auch die akzeptable Qualität von 25 dB eingehalten werden. Die Qualitätsschwankungen können durch Einsatz des SORA-Verfahrens reduziert werden. Hier wurde eine Verringerung um 4 dB gegenüber dem Standard erreicht.

## 5.7 Abschließende Bewertung und Gesamtfazit

Die durchgeführte Leistungsbewertung liefert einen qualitativen und quantitativen Vergleich des neuen selbstoptimierenden Verfahrens zur adaptiven Einstellung des Fehlerschutzes SORA gegenüber den verwendeten Referenzverfahren. Durch die Breite der verwendeten Testszenarien lässt sich eine objektive Einschätzung der Vor- und Nachteile des neuen Verfahrens geben. Darüber hinaus erfolgt eine Bewertung der selbstoptimierenden Eigenschaften sowie des Implementierungsaufwandes des Verfahrens ebenfalls im Vergleich zu den Referenzverfahren. Zur Bewertung werden die im Kapitel 2 definierten Anforderungen und Kriterien verwendet.

Bei den durchgeführten Testreihen auf der Netzebene wird die erreichbare Paketfehlerrate als primäres Kriterium herangezogen. Zusammenfassend lassen sich aus dem Verhalten der Paketfehlerrate in den Testreihen folgende Erkenntnisse formulieren:

- **Robustheit und Skalierung.** Bei der Robustheit und bei der Skalierung sind Verbesserungen bei Einsatz des neuen SORA-Verfahrens gegenüber den Referenzverfahren zu erkennen. Insbesondere können diese Kriterien beim Fehlerverhalten verbessert werden.
- **Maximalleistung.** Sowohl beim Fehler- als auch beim Lastverhalten sind keine Verbesserungen der Maximalleistung möglich. Da diese stärker von dem eingesetzten Scheduling-Verfahren als von der Fehlerschutzeinstellung abhängt, ist dieses Ergebnis plausibel und vertretbar. Bei diesem Kriterium verhalten sich alle untersuchten Verfahren, bei gleichem Scheduling, auch gleich.

Damit lässt sich schließen, dass das neue Verfahren zur adaptiven Fehlerschutzeinstellung in der Lage ist, die im Abschnitt 3.3 erfassten Defizite der Referenzverfahren zu kompensieren. Mit Bezug auf die Ergebnisse der im Vorfeld durchgeführten Analysen in der

lassen sich die Ergebnisse des neuen Verfahrens entsprechend der Tabelle 5-11 formulieren. Es ist aus diesen Ergebnissen zu erwarten, dass es auch die Eigenschaften der Videoebene für die Übertragung skalierbar codierter Videodaten positiv beeinflussen kann.

Kriterium	IEEE 802.11e		RTRA		SORA	
	Fehler	Last	Fehler	Last	Fehler	Last
Robustheit	-	+	-	O	+	+
Skalierung	-	+	O	+	+	+
Selbstoptimierung	Statisch		Selbstoptimierend		Selbstoptimierend	
Erfüllungsgrad: + geeignet, O neutral, - nicht geeignet						

Tabelle 5-11: Gesamtbewertung der Netzebene

Die Testreihen der Videoebene decken die gesamte Übertragungskette von einem Quellsignal bis zu einem decodierten Videosignal ab. Zur Bewertung dienen ebenfalls die im Kapitel 2 definierten Kriterien. Ähnlich zu den Testreihen der Netzebene wird durch die Auswahl der einzelnen Testfälle versucht, eine möglichst objektive Einschätzung zu

erreichen. Durch die Tatsache, dass der verwendete Videodecoder keine Fehler des Base Layers für die Decodierung toleriert, können an dieser Stelle die ermittelte Gesamtqualität sowie die Qualitätsschwankungen nur unter der idealisierten Annahme eines robusten Base Layers bewertet werden. Es lassen sich aus den Untersuchungen folgende Erkenntnisse formulieren

- **Robustheit und Übertragungsverzögerung.** Die wesentlichen Verbesserungen lassen sich durch das neue SORA-Verfahren bei der Robustheit des Base Layers erzielen. Hierbei liegen die Durchschnittswerte bei 1-2% im Normalbetrieb und bis zu 15% in Extremsituationen. Die minimal erreichbare Robustheit liegt im Normalbetrieb bei  $r_{f_{\min}} > 96\%$ , was in den Testreihen einer Verbesserung gegenüber dem Standard um 13% darstellt. Die Erhöhung der Robustheit geht durch steigende Übertragungswiederholungen auf Kosten einer höheren Übertragungsverzögerung. Hier wurde im Normalbetrieb gegenüber dem Standard im Mittel eine Steigerung um 160ms erfasst, in Spitzenwerten bis zu 2s.
- **Gesamtqualität PSNR.** Die Bewertung erfolgte hierbei unter der idealisierten Annahme, dass ein robuster Base Layer bereits vorliegt. Unter diesen gegebenen Randbedingungen konnten keine größeren Veränderungen bei der in PSNR gemessenen Gesamtqualität erkannt werden. Alle getesteten Verfahren erreichen unter Normalbedingungen nahezu gleiche Qualitätsergebnisse. Verbesserungen von ca. 1dB sind beim Einsatz des neuen SORA-Verfahrens unter Extremsituationen möglich.
- **Qualitätsschwankungen.** Die Bewertung erfolgte hier ebenfalls unter der idealisierten Annahme, dass ein robuster Base Layer vorliegt. Bei den durch  $\sigma_Q$  repräsentierten Qualitätsschwankungen lassen sich beim Einsatz des neuen Verfahrens sowohl im Normalbetrieb als auch unter Extremsituationen Verbesserungen feststellen. Diese liegen im Bereich von 1-3 dB.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Zielsetzung der Arbeit, die in der Schaffung einer verbesserten Robustheit liegt, erreicht werden konnte. Diese Eigenschaft ist für die Übertragung von skalierbar codierten Videodaten von einer hohen Bedeutung, da die einzelnen Layer hierarchisch voneinander abhängen. Unter den idealisierten Untersuchungsbedingungen kann im Rahmen der Arbeit keine wesentliche Verbesserung der Gesamtqualität nachgewiesen werden. Es ist jedoch abzusehen, dass mit einem

Videodecoder mit Toleranz gegenüber Fehlern im Base Layer, eine Steigerung der Gesamtqualität durch das neue SORA-Verfahren erreicht werden kann, da insbesondere die Verfügbarkeit fehlerfreier Base Layer Frames von grundlegender Bedeutung für die Videoqualität bei der skalierbaren Videocodierung ist.

Bei den Qualitätsschwankungen ist bereits unter den idealisierten Bedingungen eine Verbesserung erkennbar. Auch hier ist bei Einsatz eines realistischen Decoders zu erwarten, dass sich das neue Verfahren weiter abhebt.

Die gezeigten Ergebnisse können bei einer selbstoptimierenden Arbeitsweise des Verfahrens in der Netzschnittstelle erreicht werden. Dadurch ist keine komplexe Parametrierung aus der Videoebene erforderlich. Dies hat Vorteile für die Implementierung, da die Netzschnittstelle unabhängig von der Videoapplikation arbeiten kann. Insgesamt stellt das neue SORA-Verfahren keine wesentlich höheren Implementierungsanforderungen im Vergleich zum Standardverfahren nach IEEE 802.11 und ist mit diesen kompatibel. Es ist lediglich eine Erfassung der Fehlerrate der physikalischen Übertragung erforderlich, aus der das erforderliche Retry Limit berechnet wird. Dies ist durch eine softwarebasierte Implementierung auf der Treiberebene möglich. Gegenüber dem RTRA Verfahren kann dadurch eine wesentliche Vereinfachung bei der Implementierung erreicht werden.

Hinsichtlich der gestellten Anforderungen an eine qualitative Videoübertragung kann durch die Leistungsbewertung gezeigt werden, dass im Vergleich das SORA-Verfahren das einzige ist, dass eine Robustheit von über 95% erreichen kann. Dabei liegen die erhöhten Übertragungsverzögerungen in allen Fällen in einem Bereich unter 5s. Damit ist das Verfahren sehr gut für ein robustes Videostreaming geeignet.





## **6 Zusammenfassung und Ausblick**

### **6.1 Zusammenfassung der Inhalte und Ergebnisse**

Drahtlose Vernetzung und multimediale Anwendungen sind zwei wesentliche Trends in der heutigen Kommunikationstechnik. Neue Technologien wie die skalierbare Videocodierung bieten Ansätze für Verbesserungen insbesondere für die Erhöhung der Robustheit bei Videoübertragungen. Allerdings ergeben sich gleichzeitig Anforderungen an die Übertragung in den Netzen, die durch die Spezifikation neuer Referenzarchitekturen adressiert werden müssen. An den Beispielen eines um Videoübertragung erweiterten Behördenfunks sowie einer drahtlosen Heimvernetzung kann verdeutlicht werden, dass für die Nutzung der skalierbaren Videocodierung für eine robuste Videoübertragung in drahtlosen lokalen Netzen relevante Anwendungsszenarien existieren. Insbesondere kann durch Einsatz der qualitätsskalierbaren Videocodierung die Robustheit in den betrachteten Szenarien gesteigert werden. Allerdings sind dafür neue Verfahren erforderlich, die die Übertragung qualitätsskalierbar codierter Videodaten in drahtlosen Netzen besser unterstützen, die die spezifischen Anforderungen in passender Weise umsetzen. Das im Rahmen der Arbeit vorgestellte SORA-Verfahren trägt dazu bei, da es auf der Basis adaptiver Retry Limits des eingesetzten ARQ-Fehlerschutzes die Robustheit insbesondere für die Übertragung des Base Layers steigern kann.

Der thematische Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt in der Steigerung der Robustheit bei der Übertragung skalierbar codierter Videodaten in drahtlosen lokalen Netzen. Hierfür wird ein neues Verfahren für die adaptive Einstellung des ARQ-Fehlerschutzes bei der drahtlosen Übertragung vorgeschlagen, das in der Lage ist, die Robustheit bei der Übertragung des Base Layers der skalierbar codierten Videodaten maßgeblich zu erhöhen. Dem Entwurf des Einstellverfahrens für den ARQ-Fehlerschutz liegt eine Modellbetrachtung und simulative Verifikation zu Grunde. Der in der Arbeit vorgeschlagene Lösungsansatz wird in eine Übertragungsarchitektur auf Basis einer mehrklassigen priorisierten Übertragung integriert, die den Anforderungen der

angestrebten Anwendungsszenarien am besten gerecht wird. Durch eine simulative Leistungsbewertung auf Basis eines WLANs kann gezeigt werden, dass durch diesen Ansatz eine Verbesserung der Robustheit bei der Übertragung skalierbar codierter Videodaten erreicht wird. Konkret kann im normalen Betrieb eine mittlere Reduzierung der fehlerhaften Base Layer Frames um bis zu 2%, in Extremfällen um bis zu 15% aufgezeigt werden. Noch signifikanter sind die Unterschiede beim der minimal erreichbaren Robustheit. Hier liegt das SORA-Verfahren auch im Normalbetrieb mit 96% um bis zu 13% über dem Standardverfahren.

In einem ersten Schritt der Arbeit wurden die zu Grunde liegenden Verfahren der skalierbaren Videocodierung und der drahtlosen Übertragung zum aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik aufgearbeitet. Gleichfalls werden auf der Basis definierter Anwendungsszenarien sowie aus den Eigenschaften der skalierbaren Videocodierung und der drahtlosen Übertragung Anforderungen an eine robuste Übertragung skalierbar codierter Videodaten aufgestellt. Als eine wichtige Anforderung aus den betrachteten Netzszenarien wird die Eigenschaft zur Selbstoptimierung formuliert. Demnach müssen Optimierungsverfahren auf der Netzebene autonom in den einzelnen Knoten arbeiten, da in den betrachteten Netzszenarien keine zentrale Intelligenz vorausgesetzt werden kann.

Aufbauend auf den Anforderungen wurden Bewertungskriterien definiert, mit denen eine quantitative Beurteilung der Erfüllung der definierten Anforderungen möglich ist. Hierbei erfolgt eine Einteilung in die Netzebene und die Videoebene. Wesentliche Größe der Netzebene ist die Paketfehlerrate, die direkten Einfluss auf die erreichbare Videoqualität hat. Auf der Videoebene zählt neben der als PSNR gemessenen objektiven Videoqualität auch die Varianz der Qualitätsschwankungen einer Sequenz als einzubeziehendes Bewertungskriterium.

Unter Einbeziehung der aufgestellten Anforderungen wurden bereits existierende Verfahren und Lösungsansätze für die Übertragung skalierbar codierter Videodaten analysiert. Zur Schaffung einer systematischen Übersicht der verschiedenen Verfahren entwirft die Arbeit eine geeignete Klassifizierungsmethodik zur Einordnung der verschiedenen Architekturansätze der Verfahren. Die Methodik unterscheidet drei grundlegende Arten von Übertragungsarchitekturen: Ende-zu-Ende, Multipfad Routing und die mehrklassige priorisierte Übertragung. Bei den untersuchten Verfahren konnten viele der Verfahren eindeutig einer Gruppe zugewiesen werden. Es wurden aber auch gemischte Verfahren identifiziert, die verschiedene grundlegende Architekturansätze kombinieren.

Auf Basis der erarbeiteten Grundlagen und der aufgestellten Anforderungen und Kriterien erfolgt im Lösungsansatz der Arbeit der Entwurf einer Übertragungsarchitektur für die Übertragung skalierbar codierter Videodaten in drahtlosen lokalen Netzen. Dabei wurden zwei Varianten des Scheduling verschiedener Prioritätsklassen näher betrachtet. Es konnte durch die Untersuchungen gezeigt werden, dass eine mehrklassige Übertragung mit der Klassifizierung auf der Ebene des Medienzugriffs eine höhere Leistungsfähigkeit erreichen kann, als beim Einsatz eines PQ Schedulers in der Netzschnittstelle. In einem folgenden Schritt wurden die Übertragung nach dem Standard IEEE 802.11e sowie das RTRA-Verfahren als typische Referenzverfahren ermittelt und festgelegt. Diese Ansätze wurden in einer nachfolgenden Detailanalyse weiterführenden simulativen Untersuchungen unterzogen. Hierbei konnte herausgefunden werden, dass ein wesentliches Defizit der vorliegenden Ansätze in der verwendeten Einstellung des Fehlerschutzes zu finden ist.

Von daher wurde für einen weiteren Schwerpunkt der Arbeit der Entwurf eines verbesserten selbstoptimierenden Einstellverfahrens für den Fehlerschutz als Ziel gesetzt. Für das neue SORA-Verfahren (Self Optimizing Retry Adaptation) wird das bei dem Standard IEEE 802.11 bereits zu Grunde liegende ARQ-Protokoll als Basis verwendet. Ausgehend von Ansätzen aus der Literatur wurde ein Modell für die Einstellung des ARQ-Protokolls durch die maximale Anzahl der Sendewiederholungen (Retry Limit) abgeleitet und durch Simulationen bestätigt. Auf Basis der dabei gewonnenen Erkenntnisse wurde ein neues vereinfachtes und autonom arbeitendes Einstellverfahren für das Retry Limit entworfen. Das Verfahren wurde in die bereits untersuchten Netzschnittstellen für die mehrklassige Übertragung integriert und auch dort durch simulative Untersuchungen bestätigt.

Für eine umfassendere Beurteilung wurde das neue Verfahren einer Leistungsbewertung auf der Netz- und der Videoebene unter Einbeziehung verschiedener Testszenarien unterzogen. Als wichtigstes Ergebnis des neuen Einstellverfahrens ist die Verbesserung der Robustheit des Base Layers herauszustellen. So konnte durch die Leistungsbewertung gezeigt werden, dass unter normalen Betriebsbedingungen eine mittlere Verbesserung der Robustheit des Base Layers von bis zu 2% und in den Extremsituationen eine Verbesserung um bis zu 15% gegenüber den verwendeten Referenzszenarien erreicht wird. Bei der minimal erreichbaren Robustheit liegt das SORA-Verfahren im Normalbetrieb mit 96% um bis zu 13% über dem Standardverfahren. Es ist damit das einzige Verfahren, das bei allen Tests die Robustheitsanforderungen für gute Qualität im Videostreaming erreichen kann. Die Auswertungen zur Videoqualität konnten nur idealisiert vorgenommen werden, so dass der Gewinn bei der Robustheit in den PSNR-Kurven nicht gezeigt werden konnte. Allerdings konnten auch bei den idealisierten Betrachtungen keine maßgeblichen

negativen Auswirkungen des neuen SORA-Verfahrens festgestellt werden. Bei den Qualitätsschwankungen wird durch das neue Verfahren ebenfalls eine Reduzierung erreicht. Das entworfene Verfahren arbeitet darüber hinaus selbstoptimierend und ist konform zum Standard IEEE 802.11. Das SORA-Verfahren kann aufgrund seiner geringen Komplexität softwarebasiert in einer WLAN Schnittstelle nach IEEE 802.11e implementiert werden. Wichtig dabei ist, dass der verwendete Chipsatz eine nutzerspezifische Einstellung des Retry Limits erlaubt. Weiterhin muss es erlauben, die Information für die Verlustrate  $P_e$  abzufragen.

## 6.2 Vorschläge für Erweiterungen und Ausblick

Die vorliegende Arbeit deckt durch die gewählte Vorgehensweise einen kompletten Entwurfszyklus für die Konzeption der Übertragung skalierbar codierter Videodaten in drahtlosen Netzen ab und geht im Schwerpunkt auf eine konkrete Verbesserung bei der Einstellung des Fehlerschutzes ein.

Die Untersuchung der Thematik hat aufgrund der Breite des Themenfeldes eine Vielzahl an Lösungsansätzen für weitere Optimierungen hervorgebracht, so dass sich Raum für eine ganze Reihe weiterer Verbesserungen bietet. Hierfür sind zunächst Arbeiten zu nennen, die zur weiteren Bewertung und Bestätigung des Ansatzes führen. Sobald ein SVC-Videodecoder verfügbar ist, der mit Fehlern des Base Layers umgehen kann, ist es sinnvoll weitere Testreihen zur Leistungsbewertung durchzuführen. Auch sollte das Verfahren mit zwischenzeitlich etablierten neuen Standards der drahtlosen lokalen Vernetzung wie dem IEEE 802.11g [32] verifiziert werden. Da es hier keine grundlegenden Änderungen beim Medienzugriff gibt, sondern lediglich andere Übertragungsverfahren auf der Ebene der physikalischen Übertragungsschicht eingesetzt werden, kann das SORA-Verfahren gleichermaßen integriert werden. Auch die Tatsache, dass die neuen Standards im WLAN immer höhere Übertragungsraten erlauben spricht für den bei SORA gewählten Ansatz, da die Rolle der Überlastverluste bei der Übertragung immer geringer wird und stärker auf Fehlerfreiheit bei der Übertragung zu achten ist.

Darüber hinaus können neue Testreihen konzipiert und umgesetzt werden, beispielsweise für die gezieltere Betrachtung instationärer Vorgänge, wie dem Verhalten bei sich bewegenden Knoten oder dem Auftreten von Lastschwankungen im Netz. Insbesondere sollten Untersuchungen mit VBR-Verkehrsmodellen in diese Betrachtungen aufgenommen werden. Neue Testszenarien könnten weiterhin zusätzliche Details genauer bewerten, wie

zum Beispiel die Rolle von Kollisionen oder die Besonderheiten bei der multi-hop Übertragung. Als ein nächster Schritt können Erweiterungen des Einstellverfahrens in Richtung einer Multikriterienoptimierung konzipiert werden. Hierfür kommt vor allem das Einbeziehen weiterer sehr wichtiger Einstellkriterien in Frage, wie zum Beispiel die Berücksichtigung der Übertragungsverzögerung [122].

Neben dem Lösungsansatz im Kern sind allerdings auch Betrachtungen sinnvoll, inwieweit Einzelaspekte weiter optimiert werden können, beziehungsweise wie das Verfahren optimal in übergreifende Architekturen integriert werden kann. Es wurde daher im Rahmen der Arbeit eine Reihe von Erweiterungsmöglichkeiten ausgearbeitet. Im Folgenden werden die erarbeiteten Konzepte, die sich mit den genannten Fragestellungen beschäftigen, vorgestellt und bewertet.

### **6.2.1 Intelligente Kollisionserkennung in drahtlosen lokalen Netzen**

Im Abschnitt 4.4 wurde der Einsatz des neuen selbstoptimierenden Einstellverfahrens in einem drahtlosen Netzwerk mit verschiedenen Stationen vorgestellt. Wie dort bereits beschrieben wurde, ergeben sich bei der Übertragung als Quellen für Übertragungsfehler zum einen die physikalisch bedingten Fehler (z.B. durch Störquellen) zum anderen aber auch die Kollisionen mit anderen Stationen des Netzes. Der Einsatz des ARQ-Protokolls dient dabei zur Kompensation beider Fehlerquellen und erfolgt, ohne die Fehlerursache im einzelnen Fall zu differenzieren. Oftmals erfolgt für die Auslegung der MAC-Parametrierung nur die Betrachtung einer Fehlerquelle. Eine kombinierte Betrachtung, das heißt eine Untersuchung der Überlagerung von Kollisionen und physikalisch bedingten Übertragungsfehlern erfolgte bislang eher am Rande, wie zum Beispiel in [8] und [67]. Aufbauend auf solchen Analysen lassen sich jedoch Optimierungsansätze finden, die die Umsetzung des ARQ-Verfahrens in drahtlosen lokalen Netzen optimieren. In [79] wird ein konkreter Ansatz für eine Erkennung der Fehlerursache bei Übertragungsfehlern im WLAN vorgeschlagen. Der Ansatz basiert auf der Annahme, dass bei einem physikalisch bedingten Übertragungsfehler im Empfänger zumindest ein Teil der Protokollinformationen, zum Beispiel der Header, ausgewertet werden kann, bei einer Kollision jedoch nicht. Anhand dessen wird im Empfänger eine Entscheidung der Fehlerursache getroffen. Mit Hilfe einer zusätzlich definierten NAK-Nachricht wird ein physikalisch bedingter Übertragungsfehler an den Sender signalisiert. Dieser kann anhand der erhaltenen Information besser auf den Übertragungsfehler reagieren. Im Fall des Empfangs einer NAK-Nachricht, die einen physikalisch bedingten Übertragungsfehler signalisiert, kann auf den Backoff-Mechanismus, der zur Verhinderung von Kollisionen dient, verzichtet werden. Dadurch lässt sich eine Steigerung der Leistungsfähigkeit der

Übertragung erreichen. Die Größenordnung lässt sich schwierig abschätzen, da sie von mehreren Parametern insbesondere vom Verhältnis der Kollisionen zu Übertragungsverlusten abhängt. Hierzu sind detaillierte Untersuchungen erforderlich. Der Nachteil des Ansatzes besteht darin, dass er nicht standardkonform zu den Protokollen nach IEEE 802.11 und IEEE 802.15 ist. Sowohl Sender als auch Empfänger müssen für das Erzeugen und Verarbeiten der NAK-Nachrichten proprietär erweitert werden. Standardschnittstellen können in den Mechanismus nicht einbezogen werden.

### **6.2.2 Aktives Warteschlangenmanagement**

Bei der Verwendung von Warteschlangen in paketbasierten Netzen wird in den meisten Fällen von Drop-Tail Queues ausgegangen. Das heißt, wenn der Fall einer Überlastung auftritt und die Warteschlange kein neues Paket aufnehmen kann, werden alle neuen Pakete verworfen. Die in der Warteschlange verbleibenden Pakete werden entsprechend der Servicerate der Warteschlange abtransportiert. Da das klassische Drop-Tail Queueing einige Nachteile mit sich bringt, wurden für die Paketbehandlung, zum Beispiel in Internet Routern, Konzepte für ein aktives Warteschlangenmanagement erarbeitet [15]. Hierbei wird das Drop-Tail Verhalten bei vollen oder teilweise vollen Warteschlangen durch eine andere Strategie ersetzt oder durch Zusatzmechanismen ergänzt. Neben dem Internet kann aktives Warteschlangenmanagement auch in lokalen drahtlosen Netzen eingesetzt werden [70]. Durch aktives Warteschlangenmanagement können Verbesserungen für die Übertragung von Multimediadaten [80] und insbesondere von skalierbar codierten Videodaten [49] erreicht werden. Ein Beispiel ist die Änderung der Drop-Policy von Drop-Tail auf Drop-Front. Hierbei wird bei einer vollen Warteschlange nicht jeweils das neueste Paket sondern das älteste Paket in der Warteschlange verworfen. Dadurch können beim Auftreten von Paketverlusten lange Verzögerungen vermieden werden, da immer nur die neuesten Pakete in den Warteschlangen verbleiben. Dies könnte beispielsweise auf die Videodaten der Enhancement Layer angewendet werden. Ein noch weiter optimiertes Warteschlangenmanagement kann auch die Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Videolayern erkennen und bei Überlast Pakete zusammen mit allen davon abhängigen Layern verwerfen. Dies kann in Abhängigkeit von der Fehlerrate bei der Übertragung zu einer signifikanten Lastreduzierung in den Netzschnittstellen von bis zu 50% oder mehr führen. Allerdings wäre so ein Warteschlangenmanagement sehr stark auf die Übertragung skalierbarer Videodaten angepasst und würde umfassende Eingriffe in die Hardware der Netzschnittstelle erfordern.

### 6.2.3 Einbindung in eine Cross-Layer Architektur für multi-hop Netze

Das neue selbstoptimierende Einstellverfahren behandelt im Schwerpunkt die lokale kurzfristige Reaktion einer Netzschnittstelle im Fall einer spezifischen Last-Fehler Situation beziehungsweise deren Änderung. Zum optimalen Einsatz in einem multi-hop Netz ist es sinnvoll, das Verfahren als Baustein der OSI-Schicht 2 in eine Cross-Layer Architektur einzubinden. Hierfür muss das Verfahren mit anderen Mechanismen dieser Architektur kombiniert werden. Die lokale Überwachung von  $p_l$  und  $P_e$  im SORA-Verfahren kann über eine Signalisierung zwischen verschiedenen Knoten für ein optimiertes Routing genutzt werden. So können in einem drahtlosen multi-hop Netzwerk Routen so optimiert werden, dass beispielsweise der Datenstrom des Base Layers durch Bereiche im Netz mit einem niedrigen  $P_e$  geführt wird. Durch eine zusätzliche Überwachung der Fehlerrate  $p_b$  in einem Netzknoten können auch Überlastsituationen im Netz sehr schnell erkannt werden. Über eine geeignete Signalisierung zu den Endgeräten kann so ein netzweites Verfahren zur Datenratenkontrolle aufgesetzt werden. Die Signalisierung müsste in diesem Falle durch ein erweitertes Routing Verfahren erfolgen. Einen Ansatz hierfür liefert zum Beispiel, die in [51] beschriebene QoS-Erweiterung QM-AODV des AODV-Routingprotokolls. Hierbei wird das Routing Protokoll verwendet, um neben der Verfügbarkeit von Routen auch deren Qualität zu bestimmen. Wenn eine autonome Fehlerschutzbehandlung durch das SORA-Verfahren in einem Netzknoten nicht mehr möglich ist, könnte somit dem Sender eines Videodatenstromes signalisiert werden, eine andere Route zu wählen.

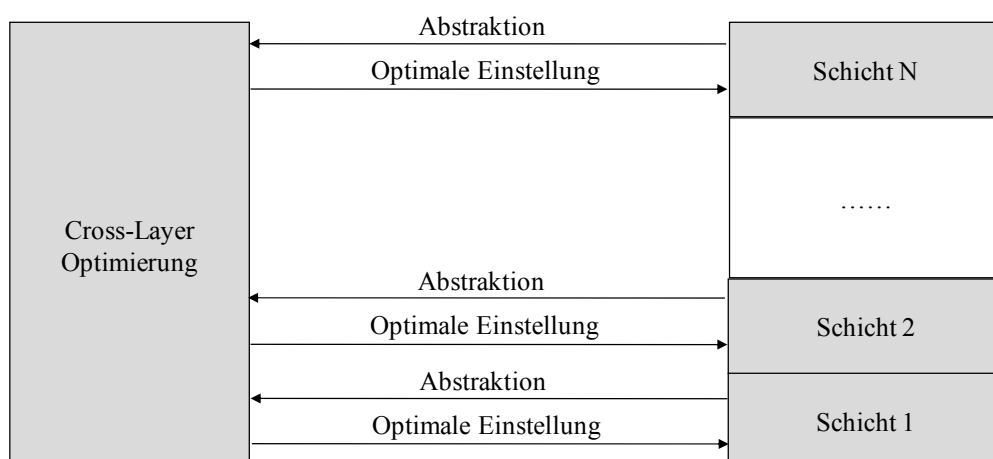


Abbildung 6.1: Allgemeiner Aufbau einer Cross Layer Architektur

Neben dieser speziellen Kombination zweier Verfahren lässt sich die Einbindung in eine Cross Layer Architektur auch generischer betrachten. Ein allgemeingültiger Aufbau einer

solchen Netzarchitektur nach [143] ist hierfür in der Abbildung 6.1 dargestellt. Eine umfassende Cross Layer Architektur muss neben dem Fehlerschutz noch andere Aspekte wie die Last- und Datenratenkontrolle beinhalten. Bei der Integration verschiedener Verfahren in eine solche Architektur ist zu berücksichtigen, dass die einzelnen Verfahren optimal aufeinander abgestimmt und angepasst werden. Auch könnte eine solche universelle Cross-Layer Architektur verschiedene im Rahmen der Arbeit klassifizierte Architekturansätze kombinieren und so sehr flexibel einsetzbar sein. Wichtige Elemente einer solchen Architektur sind Verfahren auf der physikalischen Ebene, beispielsweise Ansätze aus dem Bereich Cognitive Radio, QoS-unterstützende Verfahren auf der Ebene des Medienzugriffs und des Routings [51] [56] [57] sowie adaptive Ansätze für Multimedia-Anwendungen, zum Beispiel Verfahren zur adaptiven Datenratenkontrolle [138], das Adaptive Media Playout [47] oder optimierte Mappingverfahren zwischen Videolayern und Prioritätsklassen [60]. Eine solche Architektur sollte auch Inhalt zukünftiger Standardisierungsaktivitäten werden.



## A Anhang

### A.1 Medienzugriffsverfahren nach IEEE 802.11e

Die Schicht für den Medienzugriff (MAC-Schicht) setzt auf dem PLCP der physikalischen Übertragung auf. Ihre Aufgabe besteht in der Steuerung des Zugriffs auf den physikalischen Funkkanal, den sich die verschiedenen Stationen eines drahtlosen Netzwerkes teilen müssen. Um dies zu gewährleisten, müssen in der MAC-Schicht spezielle Regeln spezifiziert werden. Prinzipiell werden hierfür im WLAN zwei unterschiedliche Ansätze definiert: eine zentrale Steuerung des Medienzugriffs über eine Point Coordination Function (PCF) und ein dezentraler Ansatz über eine Distributed Coordination Function (DCF). Für die PCF ist ein so genannter Point Coordinator erforderlich, der in der Regel durch den Access Point übernommen wird. Dadurch lässt sich die PCF oftmals nur im Rahmen eines Infrastrukturnetzwerkes einsetzen. Die DCF kann hingegen in jeder Netzwerktopologie eingesetzt werden. Beide Formen lassen sich auch überlagern. Der Zeitraum des Medienzugriffs wird hierbei in zwei Zeitbereiche eingeteilt. Die Contention Free Period (CFP) ist der Zeitraum in dem der Funkkanal zentral verwaltet wird und die Contention Period (CP) ist der Zeitraum in dem der Kanal unter dezentraler Verwaltung steht. Zur Unterscheidung der verschiedenen Zeiträume werden verschiedene Inter Frame Spaces (IFS) definiert. Diese unterscheiden sich wie folgt in:

- **Short Interframe Spaces (SIFS):** Mindestabstand zum Senden von Steuerframes (ACK, RTS/CTS)
- **PCF Interframe Spaces (PIFS):** Zeitabstand in den bevorzugten Kanalzugriff über eine Point Coordinator
- **DCF Interframe Spaces (DIFS):** Zeitabstand, den Stationen im DCF Modus vor dem Senden mindestens abwarten müssen zur Kollisionsvermeidung

Den Zusammenhang zwischen den Interframe Spaces zeigt die Abbildung A 1. Für die DCF, bei der mehrere Stationen gleichberechtigt auf den Funkkanal zugreifen können, kommt für die Zugriffssteuerung das CSMA/CA-Verfahren (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) zum Einsatz. Hierbei wird ein zusätzlicher Backoff-Mechanismus ergänzt, der verhindern soll, dass zwei oder mehr Stationen gleichzeitig einen Sendeversuch unternehmen und es so zu einer Kollision kommt. Dabei errechnet sich eine DCF-Station auf Basis der DIFS ihre spezifische Wartezeit für den Kanalzugriff. Die Berechnung erfolgt auf Basis der Formel A-1.

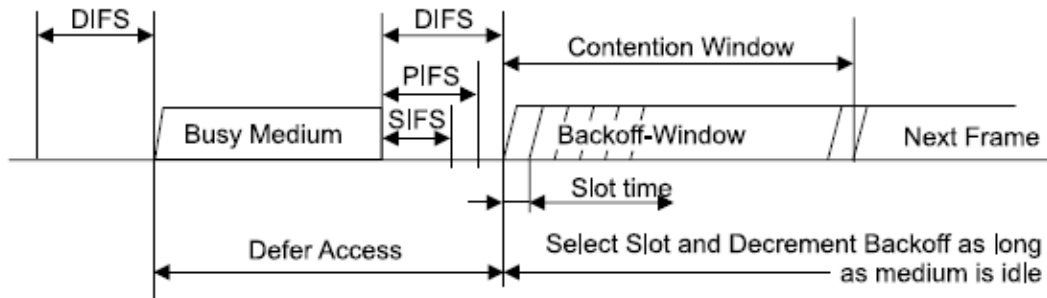


Abbildung A 1: Zusammenhang zwischen den Interframe Spaces für den Kanalzugriff

$$t_{B_j} = DIFS + rand(0, CW_j) \cdot t_{Slot} \quad (A-1)$$

Die Wartezeit ergibt sich demnach aus der DIFS und einer zufällig gewählten Dauer, die aus dem Contention Window und einer physikalisch vorgegebenen Slot Time errechnet. Durch den Zufallsfaktor wird die Wahrscheinlichkeit einer Kollision maßgeblich verringert. Jedoch können Kollisionen nicht ganz ausgeschlossen werden. Um festzustellen, ob die Übertragung erfolgreich war, muss die Station einen Acknowledge Frame (ACK) vom Empfänger erhalten. Bleibt dieser aus, schließt die Station auf eine Kollision und sendet erneut. Hierfür wird das Contention Window verdoppelt. Zusätzliche Erweiterungen wie der RTS/CTS Protokollaustausch werden durch das sogenannte Hidden-Terminal-Problem erforderlich. Details hierzu sind in [86] [133] enthalten.

Die PCF bietet bereits eine einfache Funktionalität, um Stationen bei der Übertragung zu priorisieren. Da diese jedoch für eine Multimediaübertragung mit verschiedenen Dienstklassen nicht ausreichend ist, wurde die Standarderweiterung IEEE 802.11e für eine Quality-of-Service Unterstützung im WLAN eingeführt [35]. Hierbei werden erweiterte Verfahren für den priorisierten Zugriff verschiedener Dienste auf den Funkkanal spezifiziert. Grundlegend ist dabei die Erweiterung der Architektur der MAC-Schicht bei der für verschiedene Übertragungsklassen, auch Access Categories genannt, verschiedene Warteschlangen mit spezifischen Zugriffsparametern vorgesehen werden. Einen Vergleich der MAC-Architekturen zeigt die Abbildung A 2.

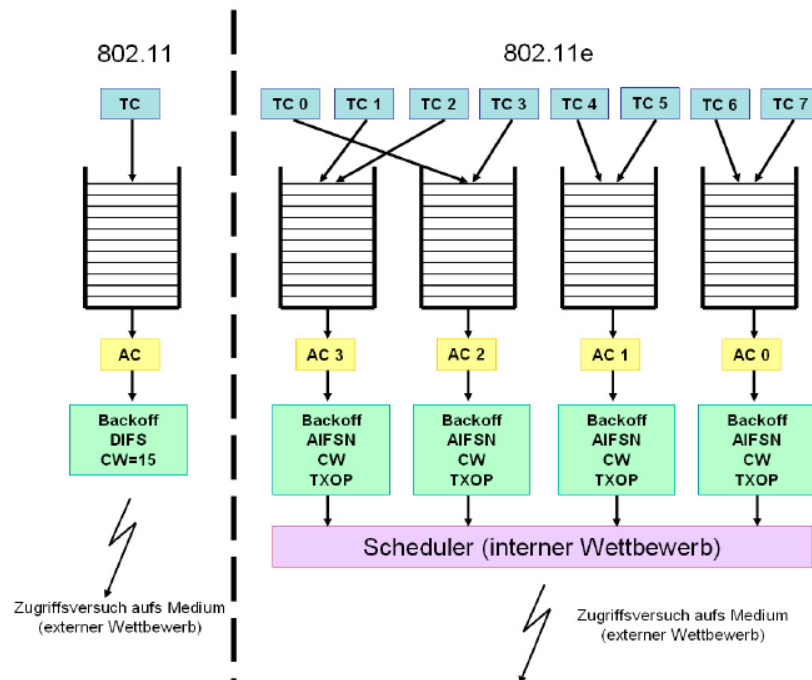


Abbildung A 2: Architektur der MAC-Schicht bei IEEE 802.11e

Für die Steuerung des Kanalzugriffs der einzelnen Übertragungsklassen werden gleichfalls neue Mechanismen in 802.11e eingeführt. Die neue Hybrid Coordination Function (HCF) definiert zwei verschiedene Verfahren:

- **HCF Controlled Channel Access (HCCA):** Erweiterung der PCF zur Unterstützung verschiedener Traffic Categories (TC)
- **Enhanced Distributed Channel Access (EDCA):** Erweiterung der DCF zur Unterstützung verschiedener Access Categories (AC)

Zur Umsetzung der HCCA ist vergleichbar zur PCF ein zentraler Hybrid Coordinator (HC) erforderlich. Dieser befindet sich im Access Point und entscheidet, welche Station mit welcher TC den Funkkanal nutzen darf. Dieser Zugriff erfolgt in der Contention Free Period, so dass keine Kollisionen bei der Übertragung zu erwarten sind. HCCA kann durch diesen zentralen Ansatz nur in Infrastrukturnetzen betrieben werden. Durch EDCA kann in der Contention Period entschieden werden welche Station mit welcher Access Category den Funkkanal nutzen darf. Hierfür enthält jede Access Category eine spezifische Arbitration Interframe Spaces (AIFS) und ein spezifisches Contention Window über die eine klassenspezifische Backoffzeit berechnet werden kann (siehe Abbildung A 3). Die Berechnung erfolgt dabei nach der Formel A-2. Als zusätzlicher priorisierender Parameter kann eine Transmission Opportunity (TXOP) definiert werden. Diese legt eine Zeit fest,



(ACK) bestätigt werden. Durch den einstellbaren Parameter Retry Limit  $L_r$  wird die maximale Anzahl an Sendeversuchen begrenzt. Der zeitliche Verlauf weicht aufgrund des Einflusses der Backoff und Arbitrierungsparameter des MAC-Verfahrens Unterschiede zu dem im Abschnitt 2.2.4 beschriebenen Grundvariante des Stop-and-Wait ARQ-Protokolls auf. In der Abbildung A 4 ist der Zeitverlauf bei einer erfolgreichen Übertragung mit Acknowledgement dargestellt.

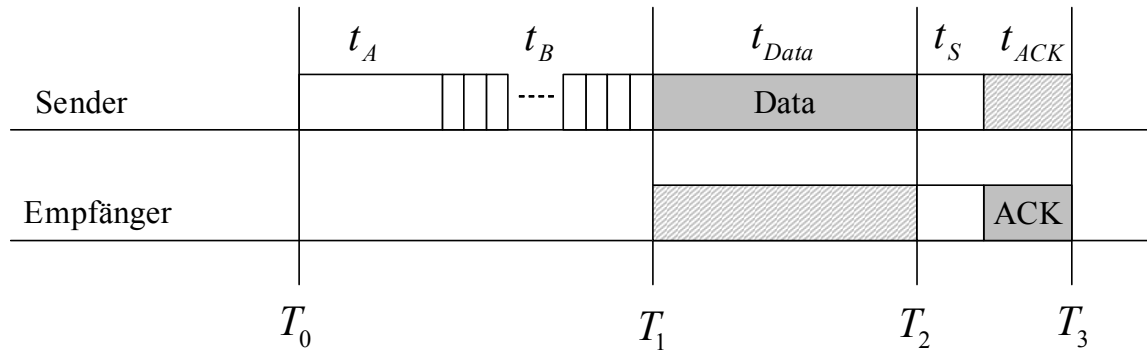


Abbildung A 4: Ablauf einer erfolgreichen Übertragung nach IEEE 802.11 (DCF)

Die sendende Station detektiert zum Zeitpunkt  $T_0$  das Medium als frei. Ab diesem Zeitpunkt muss die Station zur Kollisionsvermeidung eine bestimmte Zeit warten, bevor sie mit dem Senden beginnen darf. Der zu wartende Zeitraum ergibt sich aus einem arbitrierten Anteil und einem Zufallswert, der Backoffzeit. Für IEEE 802.11e ergeben sich die Wartezeiten nach den Formeln 3-1 bis 3-3. Wenn in der Wartezeit keine andere Station auf das Medium zugreift, kann nach Ablauf der Backoffzeit zum Zeitpunkt  $T_1$  mit dem Senden begonnen werden. Sender und Empfänger übertragen jetzt die Nutzdaten. Nach Beenden des Sendevorganges wartet der Empfänger noch einen Zeitraum  $t_s$  und sendet dann sofort, ohne Backoffvorgang, seine Bestätigungsnachricht ACK. Nach erfolgreichem Empfang der Nachricht durch den Sender ist der Sendevorgang zum Zeitpunkt  $T_3$  abgeschlossen. Kann ein Datenrahmen in der Form übertragen werden, ergibt sich eine ideale Übertragungszeit nach der Formel A-3 .

$$t_{tx_{succ}} = t_A + t_B + t_{Data} + t_S + t_{ACK} \quad (A-3)$$

Zur Behandlung des Hidden Terminal Problems im WLAN kann zusätzlich vor Beginn der Übertragung noch der Austausch einer RTS/CTS Sequenz kommen, wodurch sich weiterer Zeitbedarf für den Sendevorgang ergibt [86].

Oftmals ist eine ideale Übertragung in dieser Form nicht möglich. Zum einen kann es zu Unterbrechungen in dem Backoff-Prozess kommen, wenn eine andere Station in der Wartezeit bereits mit dem Senden beginnt. Zum anderen können Übertragungsverluste auftreten, die zwei wesentliche Ursachen haben:

- **Übertragungsverluste.** Beim Übertragen sowohl des Datenrahmens als auch der Bestätigungsnachricht können Übertragungsfehler auftreten. Bei schweren Übertragungsfehlern erkennt der Empfänger nicht den Datenrahmen. Bei Bitfehlern kann der Datenrahmen zwar empfangen jedoch nicht verarbeitet werden. Die Erkennung von Bitfehlern erfolgt mit Hilfe des FCS Felder im Rahmen [86].
- **Kollisionen.** Kollisionen sind zeitgleiche Sendeversuche zwischen zwei konkurrierenden Stationen. Obwohl das CSMA/CA Medienzugriffsverfahren darauf abzielt diese zu vermeiden, können Kollisionen, insbesondere bei hoher Auslastung des physikalischen Mediums, nicht ganz ausgeschlossen werden. Kollisionen führen in der Regel zum kompletten Auslöschen zweier Datenrahmen.

Neben den Kollisionen beim Medienzugriff zwischen verschiedenen Stationen können bei IEEE 802.11e zusätzlich auch interne Kollisionen bei Scheduling auftreten. Dies passiert immer dann, wenn in zwei Warteschlangen mit unterschiedlichen Prioritäten Wartezeiten ablaufen. Diese virtuelle Kollision kann innerhalb einer Station behandelt werden. Dabei gewinnt die Warteschlange mit der höheren Priorität den Medienzugriff.

Beim Auftreten von Kollisionen und Übertragungsverlusten wird durch das ARQ-Verfahren ein neuer Sendeversuch für den Datenrahmen unternommen. Dieser muss jedoch entsprechend der Vorschriften des MAC-Verfahrens wieder mit den entsprechenden Wartezeiten begonnen werden. Aufgrund des exponentiellen Backoffs ergibt sich für jeden Sendeversuch eine neue Backoffdauer. Die Gesamtdauer für die Übertragung eines Frames mit  $J$  Sendeversuchen ergibt sich nach der Formel A-4.

$$t_{tx} = J \cdot (t_A + t_{Data} + t_S) + \sum_{j=1}^{J+1} t_{B_j} + t_{ACK} \quad (A-4)$$

## A.3 Aufbau der Simulationsumgebung zur Analyse und Leistungsbewertung

### A.3.1 Gesamtkonzept der Simulationsumgebung

Zur Durchführung der Analysen wurde im Rahmen der Arbeit eine softwarebasierte Simulationsumgebung für die Übertragung skalierbar codierter Videodaten in drahtlosen lokalen Netzen implementiert. Eine Gesamtübersicht ist in der Abbildung A 5 dargestellt. Die Simulationsumgebung umfasst sowohl die Video- als auch die Netzebene. Weiterhin werden an mehreren Stellen der abgebildeten Übertragungskette Messdaten aufgezeichnet.

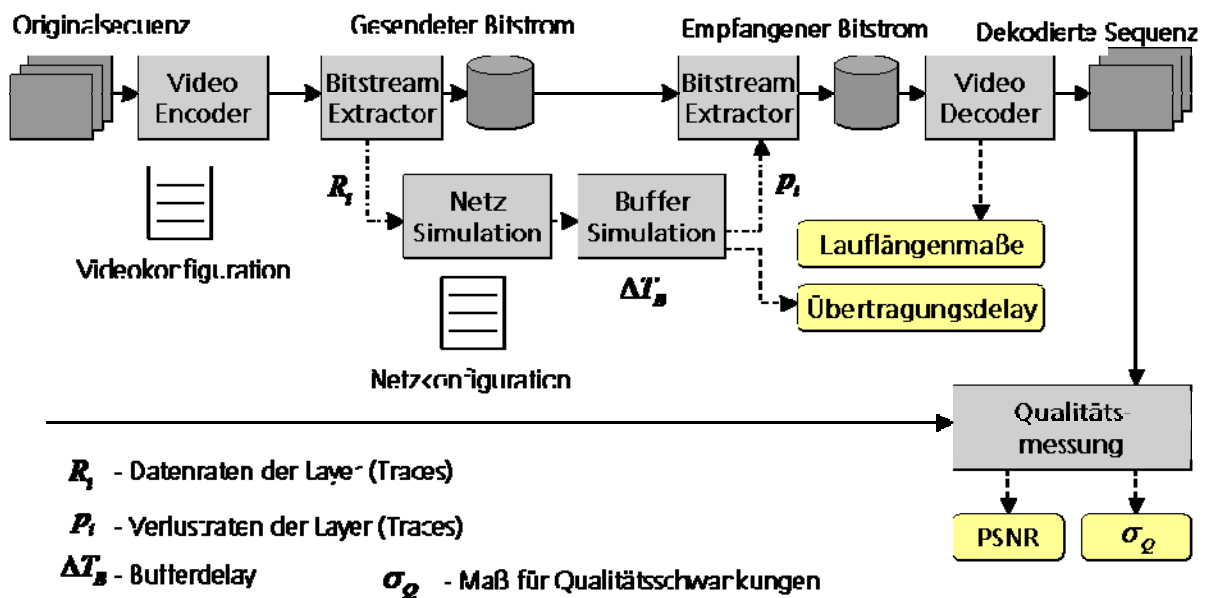


Abbildung A 5: Gesamtübersicht der Simulationsumgebung

### A.3.2 Simulation der Videoebene

Die Modellierung auf der Videoebene setzt sich aus den Komponenten Video Encoder, Video Decoder, Bitstream Extractor, Netzsimulation sowie einer Buffer Simulation und einem Modul zur Qualitätsmessung zusammen. Der Video Encoder ist für die Codierung einer vorliegenden originalen Videosequenz zuständig. Er produziert einen digitalen Bitstrom der alle Layer des skalierbaren Videos enthält. Der Video Decoder verarbeitet einen solchen Bitstrom und erzeugt daraus die sich ergebende decodierte Videosequenz am Empfänger. Für den Video Encoder und den Video Decoder werden die verfügbaren H.264 SVC Softwareimplementierungen nach [110] verwendet. Der Video Encoder wird so konfiguriert, dass eine qualitätsskalierbare Codierung in vier verschiedenen Layern

stattfindet. Die Aufteilung des Bitstromes des Encoders in die einzelnen Layer Bitströme übernimmt die Komponente Bitstream Extractor. Bei dieser Aufteilung erzeugt der Bitstream Extractor gleichzeitig für jeden Layer eine Aufzeichnung der Paketinformationen (Trace), die als Eingabe für die Netzsimulation dient. Die Details dieser Netzsimulation werden im Abschnitt A.3.3 beschrieben. Ergebnis für die Videoebene ist eine Aufzeichnung der Pakete, die über das Netz übertragen werden konnten inklusive einer Zeitinformation. Diese Aufzeichnungen werden in einer Buffer Simulation verwendet, bei der das resultierende Übertragungsdelay und die resultierende Paketfehlerrate der einzelnen Layer Bitströme berechnet werden. Der Buffer wird durch seine Größe und einen prozentualen Füllwert (z.B. 5%) konfiguriert, ab dem mit der Decodierung von Frames begonnen werden kann. Die Komponente Bitstream Extractor kann mit diesen Informationen auch dazu eingesetzt werden um die Layer Bitströme auf Basis der Aufzeichnungen von Netz und Buffer Simulation zu modifizieren. Somit liegen für die Decodierung Bitströme derart vor, als würden sie über ein reales Netz übertragen. Die Qualitätsmessung vergleicht die decodierte Sequenz mit der Originalsequenz und berechnet die Metriken für die Bewertung der Videoqualität.

### **A.3.3 Simulation der Netzebene und der drahtlosen Übertragung**

Die Simulation der Netzebene und der physikalischen Übertragung beruhen auf der Verwendung des Netzwerksimulators ns-2 [13] [76] sowie dessen Erweiterungen in [45]. Die Netzsimulation mit ns-2 ist nach dem ISO/OSI Modell strukturiert. Eine drahtlose Beispielübertragung in dem Simulator ist in der Abbildung A 6 dargestellt. Senderseitig schickt eine Quelle einen Datenstrom über einen Routing Agenten über eine Linklayersimulation (LL) mit Warteschlange (IFQ) und Medienzugriff (MAC) an eine Netzschnittstelle (NETIF). Diese bildet zusammen mit einem Ausbreitungsmodell und einer Kanalsimulation die physikalische drahtlose Übertragung nach. Empfängerseitig erfolgt die Verarbeitung in entgegengesetzter Richtung. Je nachdem, ob es sich bei dem Empfänger um das abgezielte Endgerät oder einen Netzknoten handelt, werden die Daten bis zu einer Senke oder einem Routing Agenten weitergegeben. Im Rahmen der Arbeit wurde die Implementierung der drahtlosen Übertragung um wichtige Komponenten erweitert. Diese Erweiterungen umfassen die Integration der Funktionalitäten von IEEE 802.11e auf Basis der Vorarbeiten aus [133], die Implementierung des RTRA-Verfahrens auf Basis von [64], die Implementierung des in der Arbeit spezifizierten SORA-Verfahren sowie einige Erweiterungen zu verbesserten Modellierung der physikalischen Übertragung.



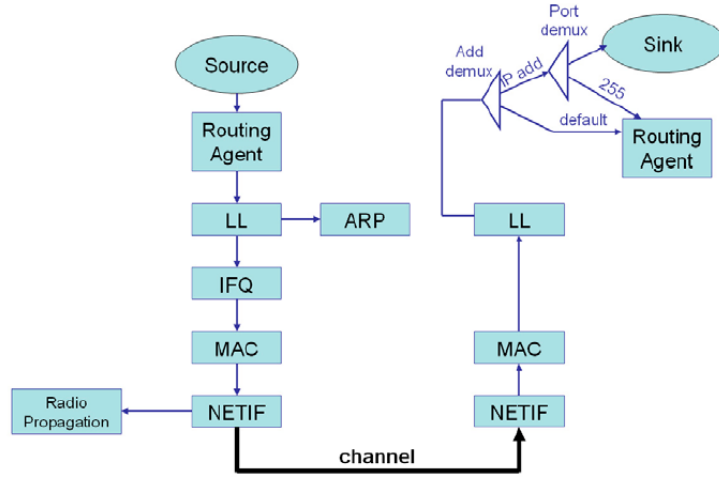


Abbildung A 6: Simulation einer drahtlosen Übertragung mit ns-2

Die Aussagekraft von Simulationsergebnissen bei der Untersuchung drahtloser Übertragungsverfahren hängt sehr stark von den implementierten Modellen für die physikalische Ausbreitung ab. Wie in [55] aufgezeigt wird, sind viele Simulationen in Arbeiten zu drahtlosen multi-hop Netzen zu abstrakt implementiert (zum Beispiel auf Basis des Free Space Loss Models nach A-5) worden, was zu wenig brauchbaren Ergebnissen führte. Von daher wird für die vorliegende Arbeit die Implementierung einer drahtlosen Simulation auf der Basis eines anerkannten und ausreichend genauen Ausbreitungsmodells vorgesehen. Allerdings darf die Komplexität des eingesetzten Modells auch nicht beliebig hoch sein, um ausreichend Simulationen in angemessener Zeit durchführen zu können. Von daher wird das in [85] und [107] vorgeschlagene Shadowing Model nach A-6 für die Implementierung ausgewählt.

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot d^2 \cdot L} \quad (\text{A-5})$$

$$\left[ \frac{P_r(d)}{P_r(d_0)} \right]_{dB} = -10 \cdot \beta \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X(\sigma)_{dB} \quad (\text{A-6})$$

Das Shadowing Model dient in der Simulation dazu, zu entscheiden, ob bei einer vorgegebenen Empfindlichkeit ein empfangenes Signal mit der Leistung  $P_r$  vom Empfänger ausgewertet werden kann oder nicht. Das Modell enthält zwei wesentliche Anteile. Zum einen wird über den Parameter  $\beta$  die Dämpfung bei der Übertragung eingestellt. Die Komponente  $X$  verkörpert eine mit dem Parameter  $\sigma$  normalverteilte Zufallsvariable durch die weitere Fading-Effekte abgebildet werden. Je nach Art der

Umgebung, in der die Übertragung stattfindet werden verschiedene Einstellungen für  $\beta$  und  $\sigma$  verwendet. Neben dem Modell für die physikalische Wellenausbreitung wurde auch das Bitfehlermodell in der Simulation erweitert. Bisher sind für die Simulation von Bitfehlern im ns-2 statistische Variable mit Gleichverteilung oder Modelle wie das Gilbert-Elliot Modell verwendet worden. Dabei wurde das aktuelle vorliegende Signalrauschverhältnis am Empfänger nicht berücksichtigt. In einem von [136] vorgeschlagenen Ansatz ist dies jedoch unter Einbeziehung der Charakteristik der verwendeten Empfängerkarte möglich. Das Verfahren ist ebenfalls in den Simulator integriert worden. Durch die Verwendung des Shadowing Modells und des erweiterten Bitfehlermodells ist eine Simulation der drahtlosen Empfangseigenschaften in Abhängigkeit der Sender-Empfängerdistanz und zusätzlicher Fading-Effekte in ausreichendem Maße möglich. Details zur Einstellung und Parametrierung der verwendeten Modelle können [45] entnommen werden.

## A.4 Konfiguration der Verifikationstests auf der Netzebene

### A.4.1 Testreihen zur Auswertung des Fehlerverhaltens

Nr.	Last	Topologie	Hintergrundlast	Entfernungsbereich
1	4 *512 kbit/s symmetrisch	Single	-	20 ... 50 m
2	4 *512 kbit/s symmetrisch	Single	4x512kbit/s	20 ... 50 m
3	4 *512 kbit/s symmetrisch	Multi	-	10 ... 30 m
4	4 *512 kbit/s symmetrisch	Multi	4x512kbit/s	10 ... 30 m
5	4 *1024 kbit/s symmetrisch	Single	-	20 ... 50 m
6	4 *1024 kbit/s symmetrisch	Single	4x512kbit/s	20 ... 50 m
7	4 *1024 kbit/s symmetrisch	Multi	-	10 ... 30 m
8	4 *1024 kbit/s symmetrisch	Multi	4x512kbit/s	10 ... 30 m

Geringe Last: 2048 kbit/s

Hohe Last: 4096 kbit/s

### A.4.2 Testreihen zur Auswertung des Lastverhaltens

#### Testreihen zum Lastverhalten symmetrisch

Nr.	Entfernung	Topologie	Hintergrundlast	Lastbereich
1	20 m	Single	-	4x(512 ... 2048) kbit/s

---

2	20 m	Single	4x512kbit/s	4x(512 ... 2048) kbit/s
3	20 m	Multi	-	4x(512 ... 2048) kbit/s
4	20 m	Multi	4x512kbit/s	4x(512 ... 2048) kbit/s
5	30 m	Single	-	4x(512 ... 2048) kbit/s
6	30 m	Single	4x512kbit/s	4x(512 ... 2048) kbit/s
7	30 m	Multi	-	4x(512 ... 2048) kbit/s
8	30 m	Multi	4x512kbit/s	4x(512 ... 2048) kbit/s

### Testreihen zum Lastverhalten asymmetrisch

Nr.	Entfernung	Topologie	Hintergrundlast	Lastbereich
1	20 m	Single	-	2 ... 8 Mbit/s
2	20 m	Single	4x512kbit/s	2 ... 8 Mbit/s
3	20 m	Multi	-	2 ... 8 Mbit/s
4	20 m	Multi	4x512kbit/s	2 ... 8 Mbit/s
5	30 m	Single	-	2 ... 8 Mbit/s
6	30 m	Single	4x512kbit/s	2 ... 8 Mbit/s
7	30 m	Multi	-	2 ... 8 Mbit/s
8	30 m	Multi	4x512kbit/s	2 ... 8 Mbit/s

**Aufteilungsschlüssel der Last für asymmetrische Tests:**

<b>Access Category</b>	<b>Lastanteil</b>
AC3	1 %
AC2	9 %
AC1	30 %
AC0	60 %

## A.5 Konfiguration der Verifikationstests auf der Videoebene

### A.5.1 Konfiguration der Testreihen der Videoebene im Normalbetrieb

Nr.	Entfernung [m]	Videsequenz	Hintergrund- last	Netztopologie
1	20	Paris CIF	Nein	Single
2	30	Paris CIF	Nein	Single
3	40	Paris CIF	Nein	Single
4	20	Paris CIF	4x1024kBit/s	Single
5	30	Paris CIF	4x1024kBit/s	Single
6	40	Paris CIF	4x1024kBit/s	Single
7	10	Paris CIF	Nein	Multi
8	20	Paris CIF	Nein	Multi
9	30	Paris CIF	Nein	Multi
10	40	Paris CIF	Nein	Multi
11	10	Paris CIF	4x1024kBit/s	Multi
12	20	Paris CIF	4x1024kBit/s	Multi
13	30	Paris CIF	4x1024kBit/s	Multi
14	40	Paris CIF	4x1024kBit/s	Multi
15	20	Children CIF	Nein	Single
16	30	Children CIF	Nein	Single
17	40	Children CIF	Nein	Single
18	20	Children CIF	4x1024kBit/s	Single

19	30	Children CIF	4x1024kBit/s	Single
20	40	Children CIF	4x1024kBit/s	Single
21	10	Children CIF	Nein	Multi
22	20	Children CIF	Nein	Multi
23	30	Children CIF	Nein	Multi
24	40	Children CIF	Nein	Multi
25	10	Children CIF	4x1024kBit/s	Multi
26	20	Children CIF	4x1024kBit/s	Multi
27	30	Children CIF	4x1024kBit/s	Multi
28	40	Children CIF	4x1024kBit/s	Multi

### A.5.2 Konfiguration der Testreihen der Videoebene in Extremsituationen

Nr.	Entfernung [m]	Videsequenz	Hintergrund- last	Netztopologie
1	43	Paris CIF	Nein	Single
2	43	Paris CIF	4x1024kBit/s	Single
3	43	Paris CIF	Nein	Multi
4	43	Paris CIF	4x1024kBit/s	Multi
5	43	Children CIF	Nein	Single
6	43	Children CIF	4x1024kBit/s	Single
7	43	Children CIF	Nein	Multi
8	43	Children CIF	4x1024kBit/s	Multi





---

## Glossar

Access Category	Prioritätsklasse die durch einen definierten Satz an Parametern für den Medienzugriff beschrieben wird.
Adaptivität	Eigenschaft eines Kommunikationssystems, die Parameter an die Umgebung, zum Beispiel physikalische Störungen oder das Vorhandensein weiterer Kommunikationsteilnehmer, selbständig anzupassen.
Ad-hoc Netz	Art einer multi-hop Vernetzung, bei der die Datenübertragung ausschließlich zwischen drahtlos vernetzten Endgeräten erfolgt.
Automatic Repeat Request	Gruppe von Fehlerschutzprotokollen, die darauf basieren, dass beim Auftreten von Übertragungsfehlern die zu übertragenden Daten erneut gesendet werden.
Backoffdauer	Zeitdauer, die beim Medienzugriff gewartet werden muss, bevor ein Datenrahmen gesendet werden darf. Die Backoffdauer wird im MAC-Verfahren berechnet.
Base Layer	Informationsanteil skalierbar codierter Videodaten, der die wichtigsten Basisinformationen beinhaltet.
Bildsequenz	Der Begriff wird in der Arbeit als Äquivalent für den Begriff Videosequenz verwendet.
Bildwiederholrate	Parameter einer Bildsequenz, der angibt, wie viele Einzelbilder pro Sekunde in der Sequenz verwendet werden
Bitfehlerrate	Verhältnis der bei einer digitalen Übertragung auftretenden Bitfehler in Bezug auf die Anzahl der gesendeten Bits in einer Zeiteinheit.
Bitstrom	Informationsfluss bestehend aus einer zeitlichen Abfolge von Einzelbits.
Codiereffizienz	Effizienz der Datenkompression durch eine Codierung.

---

Cross-Layer	Sammelbegriff für Verfahren, die auf mehreren Schichten des ISO/OSI-Modells arbeiten. Der Begriff Layer bezieht sich hierbei ausnahmsweise auf die Schichten des ISO/OSI Modells und nicht auf die Layer der skalierbaren Videocodierung
Datenkompression	Reduktion der Datenmenge zur Abbildung einer Information.
Decoder	Der Begriff wird in der Arbeit als Äquivalent für den Begriff Videodecoder verwendet.
Decodierte Sequenz	Digitale Videosequenz, die durch einen Decoder erzeugt wurde.
Decodierung	Der Begriff wird in der Arbeit als Äquivalent für den Begriff Videodecodierung verwendet.
Drop-Front Queue	Warteschlange mit begrenzter Größe, die bei Überlauf das jeweils älteste in der Warteschlange befindliche Paket verwirft.
Drop-Tail Queue	Warteschlange mit begrenzter Größe, die bei Überlauf neu ankommende Pakete verwirft.
Encoder	Der Begriff wird in der Arbeit als Äquivalent für den Begriff Videoencoder verwendet.
Encodierung	Der Begriff wird in der Arbeit als Äquivalent für den Begriff Videoencodierung verwendet.
Ende-zu-Ende	Eine Ende-zu-Ende Verbindung umfasst die gesamte Übertragungskette zwischen zwei Endgeräten.
Enhancement Layer	Informationsanteil skalierbar codierter Videodaten, der Zusatzinformationen für eine höhere Skalierung beinhaltet. Enhancement Layer sind hierarchisch von dem Base Layer oder anderen Enhancement Layern abhängig.
Fine Granularity Scalability	Codierschema für die qualitätsskalierbaren Videocodierung bei dem eine feinstufige Qualitätsskalierung erreicht werden kann.

---

Frame	Der Begriff wird in der Arbeit als Äquivalent für den Begriff Videoframe verwendet.
Hop	Datenübertragung zwischen zwei Stationen in einem Netz.
ISO/OSI Modell	Referenzmodell der ISO für das Design von Kommunikationsprotokollen (auch OSI-Referenzmodell).
Kollision	Zeitgleicher Sendeversuch von zwei oder mehreren Stationen in einem drahtlosen Netz, der in der Regel zum Verlust der übertragenen Daten führt.
Last	Der Begriff wird in der Arbeit als Äquivalent für den Begriff Verkehrslast verwendet.
Layer	Informationsanteil skalierbar codierter Videodaten. Je nach Art der Skalierbarkeit kann es sich um eine räumliche, zeitliche oder qualitative Auflösung einer digitalen Videosequenz handeln.
Layered Coding	Codierschema für die skalierbare Videocodierung, bei dem die Videoinformationen in einen Base Layer und einen oder mehrere Enhancement Layer unterteilt und in einen oder mehrere Bitströme codiert werden. Die Aufteilung ist dabei nur grob skalierbar.
MAC Scheduler	Steuerungsalgorithmus zum Zugriff auf den drahtlosen Übertragungskanal für Datenpakete mit verschiedenen Prioritäten, der in die Funktion des Medienzugriffsverfahrens integriert ist.
Mehrklassige priorisierte Übertragung	Übertragung von Daten bei der diese entsprechend ihrer Priorität in mehrere Klassen eingeteilt werden. Die Klassen werden bei der Übertragung unterschiedlich behandelt.
multi-hop	Datenübertragung von einem Sender zu einem Empfänger bei der entlang des Übertragungspfades zusätzliche Stationen im Netz involviert sind.

---

Multipfad Routing	Spezielle Art von Routingverfahren, bei der zwischen zwei Stationen mehrere disjunkte Pfade durch ein Netz ermittelt werden.
Multiple Description Coding	Spezielle Art der Codierung, bei der ein Quellensignal (im Fall der Videocodierung eine digitale Videosequenz) in mehrere gleichrangige Bitströme codiert wird, die nicht hierarchisch voneinander abhängig sind.
Netzebene	Gesamtheit aller Verfahren und Einrichtungen zur Paketverarbeitung und physikalischen Übertragung, die im ISO/OSI Modell in die Schichten 1 bis 4 einzuordnen sind.
Originalsequenz	Videosequenz, die aus einer Originalquelle (z.B. einer Kamera) stammt und noch nicht codiert wurde.
Packet Scheduler	Steuerungsprogramm, das die Übertragung mehrerer Pakete über einen Übertragungskanal regelt.
Paket	Übertragungseinheit auf den Schichten 3 und 4 des ISO/OSI Modells.
Paketfehlerrate	Verhältnis der bei einer paketbasierten Übertragung fehlerhaft empfangener oder verlorener Pakete in Bezug auf die Anzahl der gesendeten Pakete in einer Zeiteinheit.
Playout Delay	Verzögerung beim Abspielen multimedialer Inhalte am Empfänger. Zur Kompensation von Schwankungen der Übertragungsverzögerung einzelner Pakete werden die Daten am Empfänger vor dem Abspielen gepuffert, wodurch das Playout Delay entsteht.
PQ Scheduler	Steuerungsprogramm zum Zugriff auf den drahtlosen Übertragungskanal für Datenpakete mit verschiedenen Prioritäten, das nach dem Prinzip des Priority Queueings arbeitet.

---

Priority Queueing	Spezielle Art des Queueings, bei dem mehrere Paketströme mit verschiedenen Prioritäten verarbeitet werden können.
Quality of Service	Überbegriff für Metriken und Verfahren, die die Qualität eines Netzes in Bezug auf die Umsetzbarkeit von Diensten beschreiben und beeinflussen.
Quantisierungsparameter	Parameter zur Einstellung der Quantisiererstufe in einem Videoencoder. Durch den Quantisierungsparameter werden maßgeblich die Videoqualität und die Datenrate des entstehenden Bitstromes beeinflusst.
Queue	Der Begriff wird in der Arbeit als Äquivalent für den Begriff Warteschlange verwendet.
Queueing	Mechanismus des Einsatzes von Warteschlangen bei der paketbasierten Übertragung. Dies umfasst das Aufnehmen von Paketen in eine Warteschlange sowie das Herauslösen von Paketen aus einer Warteschlange.
Rahmen	Als Rahmen wird ein Übertragungsrahmen auf den Schichten 1 und 2 des ISO/OSI Modells definiert. Wenn nicht explizit anders angegeben, wird davon ausgegangen, dass in einem Rahmen genau ein Paket übertragen wird.
Retry Adaptation	Adaptive Anpassung des Retry Limits beim Einsatz des ARQ-Protokolls.
Retry Limit	Parameter des ARQ-Protokolls, der die maximal erlaubte Anzahl an Sendewiederholungen angibt.
Robustheit	Eigenschaft eines Kommunikationssystems, auch beim Auftreten von Störungen, zum Beispiel physikalischen Störungen oder Interferenzen bei der drahtlosen Übertragung, die Daten der Anwendungsebene fehlerfrei zu übertragen.
Routing	Überbegriff für Verfahren und Protokolle zum Auffinden von Pfaden zwischen verschiedenen Stationen in einem Netz.

---

Scheduler	Steuerungsprogramm zur Regelung des zeitlichen Zugriffs auf Systemressourcen. Sofern nicht anders angegeben, wird im Rahmen dieser Arbeit als Scheduler ein Steuerungsprogramm zur Regelung des Zugriffs auf den drahtlosen Übertragungskanal verstanden.
Schicht	Der Begriff wird in der Arbeit zur Einordnung in das ISO/OSI Modell verwendet.
Selbstoptimierung	Eigenschaft eines Kommunikationssystems, seine Parametrierung adaptiv zur Erreichung einer Zielvorgabe anzupassen.
single-hop	Direkte Datenübertragung von einem Sender zu einem Empfänger ohne dass dabei weitere Stationen in einem Netz involviert sind.
Skalierbare Videocodierung	Besondere Art der Videocodierung, bei der eine digitale Videosequenz in verschiedenen Bildformaten, Bildwiederholraten oder Bildqualitäten aufgeteilt wird und in mehrere Bitströme codiert wird. Die entstehenden Bitströme sind dabei hierarchisch voneinander abhängig.
Skalierbarkeit	Fähigkeit, bei einer Funktion Ressourcenbedarf und Leistungsfähigkeit analog zueinander einzustellen.
Unequal Error Protection	Verfahren zur Realisierung eines ungleichgewichteten Fehlerschutzes für verschiedene Klassen von Daten auf Basis einer Fehlerschutzcodierung.
Verkehrslast	Aufkommen an gesendeten Daten innerhalb einer Zeiteinheit.
Videocodierung	Verringerung der Datenrate und des Speicherplatzbedarfs eines digitalen Videos durch Einsatz einer Datenkompression.
Videodecoder	Einheit, die aus einem digitalen komprimierten Bitstrom eine digitale Videosequenz erzeugt.

---

Videodecodierung	Prozess der Erzeugung einer digitalen Videosequenz in einem Decoder.
Videoebene	Gesamtheit aller Verfahren und Einrichtungen zur Verarbeitung und Codierung digitaler Videosequenzen, die im ISO/OSI Modell in die Schichten 5 bis 7 einzuordnen sind.
Videoencoder	Einheit, die aus einer digitalen Videosequenz einen digitalen komprimierten Bitstrom erzeugt.
Videoencodierung	Prozess der Erzeugung eines digitalen komprimierten Bitstromes im Encoder.
Videoframe	Bezeichnung für ein Einzelbild einer Videosequenz.
Videokompression	Äquivalenter Begriff zu Videocodierung.
Videosequenz	Darstellung eines Videos als zeitlicher Ablauf von Einzelbildern.
Virtual Collision Handler	Instanz eines mehrklassigen MAC-Verfahrens, die Kollisionen zwischen verschiedenen Klassen innerhalb einer Station auflöst.
Warteschlange	Eine Warteschlange ist eine Datenstruktur, die Anforderungen an ein System verwaltet, das diese nicht sofort abarbeiten kann. In der Arbeit wird der Begriff konkret für Warteschlangen zur Zwischenspeicherung von Paketen verwendet.
Wireless Meshed Network	Art einer multi-hop Vernetzung, bei der die Datenübertragung über eine aus speziellen drahtlosen Netzknoten gebildete Netzinfrastruktur erfolgt, an die drahtlose Endgeräte angebunden werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] E. Amir, S. McCanne, and M. Vetterli, "A Layered DCT Coder for Internet Video," *International Conference on Image Processing*, Lausanne, Switzerland, pp. 13–16, September 1996.
- [2] R. Aravind, M. R. Civanlar, and A. R. Reibman, "Packet loss resilience of MPEG-2 scalable video coding algorithms," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 6, no. 5, pp. 426–435, October 1996.
- [3] A. Banchs, A. Azcorra, and R. Cuevas, "Applications and challenges of the 802.11e EDCA mechanism," *IEEE Network*, vol. 19, no. 4, pp. 52–58, July/August 2005.
- [4] N. Bayer und B. Xu, "Potentials and Challenges of Ad hoc and Mesh Networks" vorgestellt auf dem 5. Workshop des ITG Fachausschusses 5.2 "Zukunft der Netze", Mittweida, 2005.
- [5] [Online] Bluetooth Special Interest Group, online verfügbar unter: <http://www.bluetooth.org>, zitiert: 07.05.2011.
- [6] F. Büllingen und P. Stamm, „Mobile Multimedia-Dienste - Deutschlands Chance im globalen Wettbewerb. Eine internationale Vergleichsmarktanalyse.“ Wissenschaftliches Institut für Kommunikation (WIK) im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Bad Honnef, Juli 2004.
- [7] J. Chakareski, S. Han, and B. Girod, "Layered Coding vs. Multiple Descriptions for Video Streaming over Multiple Paths," *Proceedings of the Eleventh ACM International Conference on Multimedia*, Berkeley, USA, 2003.
- [8] P. Chatzimisios, A. Boucouvalas, and V. Vitsas, "Performance analysis of IEEE 802.11 DCF in presence of transmission errors," in *Proc. IEEE International Conference on Communications*, vol. 7, pp. 3854–3858, 2004.
- [9] [Online] Chip Media-Information , Markt für Telekommunikation, online verfügbar unter: <http://www.chip.de/marktdaten>, zitiert: 07.05.2011.



- 
- [10] C. Conklin and S.S. Hemami, "A Comparison of Temporal Scalability Techniques," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 909-919, Sept. 1999.
  - [11] G. Côté, B.Erol, M.Gallant, and F. Kossentini, "H.263+: Video Coding at Low Bit Rates," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 8, no. 7, pp.849-866, Nov. 1998.
  - [12] [Online] G. Fairhurst, L. Wood, "Advice to link designers on link Automatic Repeat reQuest (ARQ)," RFC3366, online verfügbar: [www.ietf.org/rfc](http://www.ietf.org/rfc), zitiert 13.06.2009.
  - [13] K. Fall and K. Varadhan (editors), "The ns manual," January 2005.
  - [14] N. Färber, "Feedback-Based Error Control for Robust Video Transmission," Dissertation, University Erlangen-Nuremberg, March 2000.
  - [15] V. Firoiu and M. Borden, "A Study of Active Queue Management for Congestion Control," in *Proc. of IEEE INFOCOM 2000*, Tel-Aviv, Israel, 2000.
  - [16] P. Frossard and O. Verscheure, "Joint Source/FEC Rate Selection for Quality-Optimal MPEG-2 Video Delivery," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 10, no. 12, pp. 1815-1825, Dec. 2001.
  - [17] B. Girod, K. W. Stuhlmüller, M. Link, and U.Horn, "Packet loss resilient internet video streaming", in *Proc. VCIP*, vol. 3653, Jan. 1999.
  - [18] N. Gogate, D. Chung, S. S. Panwar, and Y.Wang, "Supporting image/video applications in a multihop radio environment using route diversity and multiple description coding," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol.12, no. 9, pp.777-792, Sept. 2002.
  - [19] R. G. Golden, "Service and Device Discovery: Protocols and Programming", McGraw-Hill Professional, 2002.
  - [20] V. K. Goyal, "Multiple Description Coding: Compression Meets the Network," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 18, no. 5, pp. 74 -- 94, Sept. 2001.
  - [21] M. Heidrich und M. Augel, "Aktuelle und Zukunftsträchtige drahtlose Übertragungstechnologien," *Tagungsband zum 2. CTI-Fachforum: Integration mobiler Endgeräte in das Fahrzeug*, München, 2005.

- [22] M. Heidrich, A. Golovko and S. Siorpaes, "An Emulation Framework for Ubiquitous Service Discovery," *Proc. of The Seventh International Conference on Ubiquitous Computing UBICOMP*, Tokyo, Japan, 2005.
- [23] M. Heidrich, M. Zeller und J. Jiru, "Fehlerrobuste Videoübertragung in drahtlosen multi-hop Ad-hoc Netzen," in *Proc. ITG Fachtagung Elektronische Medien - 11. Dortmunder Fernsehseminar*, Dortmund, 2005.
- [24] M. Heidrich, M. Zeller und R. Knorr, "Dienstplattformen für die Gebäudekommunikation, " in *Proc. Net & Home, Nürnberger Kongress zur Telekommunikation in Gebäuden*, pp. 119-124, Nürnberg, 2002.
- [25] M. Heidrich, M. Zeller und R. Knorr, "Aktuelle Trends in der Inhausvernetzung," vorgestellt auf dem 5. *Workshop des ITG Fachausschusses 5.2 "Zukunft der Netze"*, Mittweida, 2005.
- [26] U. Horn, K. Stuhlmüller, M. Link, and B. Girod, "Robust Internet Video Transmission Based on Scalable Coding and Unequal Error Protection," *IEEE Image Communication*, vol. 15, no. 1-2, pages 77-94, Sept. 1999.
- [27] [Online] IABG, „HiMoNN – ein leistungsfähiges mobiles Ad-hoc-Netzwerk,“ Product Sheet, online verfügbar unter: [himonn.iabg.de](http://himonn.iabg.de), zitiert: 07.05.2011.
- [28] IEEE. Std 802.11-1997. Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks – Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, 1997.
- [29] IEEE Std 802.11-1999. Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks – Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 1999.
- [30] IEEE Std 802.11a, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, High-Speed Physical Layer in the 5 GHz Band, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, New York, USA, 1999.

- 
- [31] IEEE Std 802.11b, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, High-Speed Physical Layer in the 2.4 GHz Band, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, New York, USA, 1999.
  - [32] IEEE Std 802.11g, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Further High-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, New York, USA, 2003.
  - [33] IEEE Std 802.15.3: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, New York, USA, 2003.
  - [34] IEEE Std 802.11i, "Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Medium Access Control (MAC) Security Enhancements," Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, New York, USA, 2005.
  - [35] IEEE Std 802.11e, "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements," Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, New York, USA, 2005.
  - [36] IEEE Std 802.15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, New York, USA, 2006.
  - [37] ISO/IEC 11172 "Information technology – coding of moving pictures and associated audio for digital storage media at up to about 1.5 Mbit/s", Teil 1 bis 5, 1993-1999.
  - [38] ISO/IEC 13818, "Information technology – generic coding of moving pictures and audio", Teil 1 bis 10, 1996-2000.
  - [39] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11, "Overview of the MPEG-4 standard", N4668, Coding of Moving Pictures and Audio, März 2002.
  - [40] ISO/IEC 14496, "Information technology – coding of audio-visual objects", Teil 1-17, 1999 bis 2003.

- [41] ITU-T Recommendation H.261, "Video codec for audiovisual services at p x 64 kbit/s", März 1993.
- [42] ITU-T Recommendation H.263, "Video coding for low bit-rate communication", Version 2, Jan. 1998.
- [43] ITU-T, Study Group 16, "Draft for H.263++, annexes U, V, und W to recommendation H.263", Nov. 2000.
- [44] ITU-T Recommendation H.264, „Advanced Video Coding for Generic Audiovisual Services,“ Version 5, March 2010.
- [45] J. Jiru, "Übertragungsschema zur robusten Übertragung von qualitätsskalierbaren Videodaten in drahtlosen Multihop-Netzen," Diplomarbeit, Technische Universität München, 2005.
- [46] K. Jostschulte, R. Kays, and W. Endemann, "Enhancement of Wireless LAN for Multimedia Home Networking," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 51, no. 1, Feb. 2005.
- [47] M. Kalman, E. Steinbach, and B. Girod, "Adaptive Media Payout for Low-Delay Video Streaming Over Error-Prone Channels," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 14, no. 6, pp. 841-851, June 2004.
- [48] K. Kanchanasut, A. Tunpan, M.A. Awal, D.K. Das, T. Wongsaaardsakul, Y. Tsuchimoto, "A Multimedia Communication System for Collaborative Emergency Response Operation in Disaster-affected Areas," Technical Report No. TR\_2007-1, Asian Institute of Technology (AIT), Thailand, 2007.
- [49] S. Kang, Y. Zhang, M. Dai, and D. Loguinov, "Multi-Layer Active Queue Management and Congestion Control for Scalable Video Streaming," at *24<sup>th</sup> International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS) 2004*, Tokyo, Japan, 2004.
- [50] R. Kays, K. Jostschulte, and W. Endemann, "Wireless Ad-Hoc Networks with High Node Density for Home AV Transmission," *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, vol. 50, no. 2, pp. 463-471, May 2004.

- 
- [51] M. I. Kazantzidis, "MAC Intelligence for Adaptive Multimedia in 802.11 Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, , vol. 23, no. 2, pp.357-368, Feb. 2005.
  - [52] J. O. Kephart and D.M. Chess, "The Vision of Autonomic Computing," *IEEE Computer*, vol. 36, no. 1, pp. 41-50, Jan. 2003.
  - [53] L. Kleinrock, "Queueing Systems Volume 1: Theory," Wiley-Interscience, 1995.
  - [54] L. Kleinrock, "Queueing Systems. Volume 2: Computer Applications," Wiley-Interscience, 1996.
  - [55] D. Kotz, C. Newport, and C. Elliott, "The mistaken axioms of wireless-network research", Dartmouth College Computer Science Technical Report TR2003-467, July 2003.
  - [56] M. Krogmann, T. Tian, G. Stromberg, M. Heidrich, M. Huemer, „Impact of Link Quality Estimation Errors on Routing Metrics for Wireless Sensor Networks“, *Fifth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*, ISSNIP 2009, Melbourne, Australia, 2009.
  - [57] M. Krogmann, M. Heidrich, D. Bichler, D. Barisic, G. Stromberg, „Reliable, Real-Time Routing in Wireless Sensor and Actuator Networks“, *ISRN Communications and Networking*, Volume 2011, Article ID 943504, Jan. 2011.
  - [58] A. Ksentini, A. Gueroui, and M. Naimi, "Novel architecture for reliable H.26L video transmission over IEEE 802.11e," *15<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, PIMRC 2004, Barcelona, Spain, 2004.
  - [59] A. Ksentini, M. Naimi, and A. Gueroui, "Toward an Improvement of H.264 Video Transmission over IEEE 802.11e through a Cross-Layer Architecture," *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, no. 1, pp. 107-114, Jan. 2006.
  - [60] W. Kumwilaisak, Y. T. Hou, Q. Zhang, W. Zhu, C.-C. J. Kuo, and Y. Zhang, "A Cross-Layer Quality-of-Service Mapping Architecture for Video Delivery in Wireless Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Special Issue on Recent Advances in Wireless Multimedia, vol. 21, no. 10, pp.1685-1698, Dec.2003.

- [61] J. F. Lee, W. Liao, and M. C. Chen, "A MAC-Layer Differentiated Service Model in IEEE 802.11e WLANs," *IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '05*, St. Louis, USA, 2005.
- [62] J. F. Lee, W. Liao, and M. C. Chen, "A per-class QoS service model in IEEE 802.11e WLANs," *Second International Conference on Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks, QShine 2005*, Orlando, USA, 2005.
- [63] W. Li, "Overview of Fine Granularity Scalability in MPEG-4 Video Standard," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 11, no. 3, pp. 301-317, March 2001.
- [64] Q. Li and M. van der Schaar, "Providing Adaptive QoS to Layered Video Over Wireless Local Area Networks Through Real-Time Retry Limit Adaption," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 6, no. 2, April 2004.
- [65] S. Lin, D.J. Costello, and M.J. Miller, "Automatic-repeat-request error-control schemes," *IEEE Communications Magazine*, vol. 22, no. 12, pp. 5-17, Dec. 1984.
- [66] S. Lin and D.J. Costello, "Error Control Coding," Prentice Hall, 2<sup>nd</sup> edition, 2004.
- [67] E. Lopez-Aguilera, M. Heusse, F. Rousseau, A. Duda, and J. Casademont, "Evaluating Wireless LAN Access Methods in Presence of Transmission Errors," Poster paper at *IEEE INFOCOM 2006*, Barcelona, Spain, 2006.
- [68] S. Mangold, S. Choi, G. R. Hiertz, O. Klein, and B. Walke, "Analysis of IEEE 802.11e for QoS support in wireless LANs," *IEEE Wireless Communications*, vol. 10, no. 6, pp. 40-50, Dec. 2003.
- [69] S. Mao, S. Lin, S. S. Panwar, Y. Wang, and E. Celebi, "Video transport over ad hoc networks: Multistream coding with multipath transport," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Special Issue on Recent Advances in Wireless Multimedia, vol. 21, no. 10, pp. 1721-1737, Dec. 2003.
- [70] P. Marbach, "Distributed Scheduling and Active Queue Management in Wireless Networks" at *IEEE INFOCOMM 2007*, Anchorage, USA, 2007.

- 
- [71] M. K. Marina and S. R. Das, "On-demand multipath distance vector routing in ad hoc networks," at *IEEE Ninth International Conference on Network Protocols*, Riverside, USA, 2001.
- [72] F. Mattern, „Die technische Basis für das Internet der Dinge,“ in: E. Fleisch, F. Mattern (Eds.), „Das Internet der Dinge – Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis“ Springer, pp. 39-66, 2005.
- [73] F. Mattern, „Allgegenwärtige Informationsverarbeitung – Technologietrends und Auswirkungen des Ubiquitous Computing,“ in: A. Rossnagel, T. Sommerlatte, U. Winand (Eds.), „Digitale Visionen - Zur Gestaltung allgegenwärtiger Informationstechnologien“ Springer, pp. 11-38, 2008.
- [74] [Online] C. H. Nam, S. C. Liew, C. P. Fu, „An Experimental Study of ARQ Protocol in 802.11b Wireless LAN,“ online available at: [www.broadband.ie.cuhk.edu.hk/htdocs\\_bkmay2004/research/paper/Namicc2002.pdf](http://www.broadband.ie.cuhk.edu.hk/htdocs_bkmay2004/research/paper/Namicc2002.pdf), cited: 29.07.2008.
- [75] S. Nelakuditi, R. R. Harinath, E. Kusmierek, and Z. Zhang, "Providing Smoother Quality Layered Video Stream," *Proceedings of The 10th International Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV)*, Chapel Hill, USA, 2000.
- [76] [Online] The Network Simulator ns-2, online verfügbar unter: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, zitiert: 07.05.2011.
- [77] A. Norkin, "Multiple Description Coding of Visual Information," Dissertation, University of Tampere, 2007.
- [78] J.- R. Ohm, "Digitale Bildcodierung," ISBN 3-540-58579-6, Springer, Berlin Heidelberg, 1995.
- [79] Q. Pang, S. C. Liew, and V. C. M. Leung, "Design of an Effective Loss-Distinguishable MAC Protocol for 802.11 WLAN," *IEEE Communication Letters*, vol.9, no.9, Sept.2005.
- [80] M. Parris, K. Jeffay, and F. D. Smith, "Lightweight active router-queue management for multimedia networking," *Proc. of SPIE Conf. on Multimedia Computing and Networking*, San Jose, USA, 1999.

- [81] F. Pereira and I. Burnett, "Universal multimedia experiences for tomorrow," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 20, no. 2, pp. 63 – 73, March 2003.
- [82] C. E. Perkins, "Ad Hoc Networking," Addison-Wesley, 2001.
- [83] J. G. Proakis und M. Salehi, "Grundlagen der Kommunikationstechnik," 2. Auflage, Pearson, 2004.
- [84] K. R. Rao and J. J. Hwang, "Techniques and Standards for Image, Video and Audio Coding," Prentice Hall, 1996.
- [85] T.S. Rappaport, "Wireless Communications – Principles and Practice", Second Edition, Prentice Hall, 2002.
- [86] J. Rech, "Wireless LANs," 2. Auflage, Heise, 2006.
- [87] A. R. Reibman, H. Jafarkhani, Y. Wang, M. T. Orchard, and R. Puri, "Multiple Description Video Coding using Motion-compensated Temporal Prediction," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 193 – 204, March 2002.
- [88] J. Reichel, H. Schwarz, und M. Wien (Editors), "Scalable Video Coding – Joint Draft," JVT Dokument Q201, Nizza, Frankreich, Oktober 2005.
- [89] J. Reichel, H. Schwarz, und M. Wien (Editors), "Joint Scalable Video Model JSVM-4," JVT Dokument Q202, Nizza, Frankreich, Okt. 2005.
- [90] Rhode&Schwarz, „802.11 Packet Error Rate Testing,“ Application Note, 2004.
- [91] A. Rossnagel (Herausgeber), T. Sommerlatte (Herausgeber), und U. Winand (Herausgeber), „Digitale Visionen: Zur Gestaltung allgegenwärtiger Informationstechnologien,“ Springer, 2008.
- [92] R. Schäfer, H. Schwarz, D. Marpe, T. Schierl, and T. Wiegand, "MCTF and Scalability Extension of H.264/AVC and its Application to Video Transmission, Storage, and Surveillance", at *VCIP 2005*, Peking, China, 2005.
- [93] C. Scheiter, M. Heidrich und M. Zeller, "Vom Kabelsalat zum intelligenten Haus - Kommunikation im Inhouse-Bereich, Anforderungen und Techniken für die Heimautomaten," *C't*, 15, pp. 138-147, 2000.



- 
- [94] U. Schmidt, "Professionelle Videotechnik," 3. Auflage, Springer, 2003.
  - [95] M. P. Schmitt, "ARQ Systems for Wireless Communications", Dissertation, TU Darmstadt, 2002.
  - [96] C. Schuler and M. Mateescu, "Performance evaluation of ARQ protocol for realtime services in IEEE 802.11 and wireless ATM," *Proc. of the 4th ACTS Mobile Communications Summit 1999*, pp. 25 – 30, Sorrento, Italy, 1999.
  - [97] H. Schwarz, D. Marpe, and T. Wiegand, "Overview of the Scalable H.264/MPEG4-AVC Extension," in *Proc. of the International Conference on Image Processing*, Atlanta, USA, 2006.
  - [98] P. Seeling and M. Reisslein, "Video Coding with Multiple Descriptors and Spatial Scalability for Device Diversity in Multi-hop Wireless Multi-hop Networks," *Proc. of IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, pp. 278 - 283, Las Vegas, USA, 2005.
  - [99] V. Sgardoni, P. Ferre, A. Doufexi, A. Nix, D. Bull, "Frame Delay and Loss Analysis for Video Transmission over time-correlated 802.11A/G channels," *Proc. of the 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'07)*, Athens, Greece, 2007.
  - [100] J. M. Shapiro, "Embedded Image Coding Using Zerotrees of Wavelet Coefficients," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 41, no. 12, pp. 3445–3462, Dec. 1993.
  - [101] A. Shokrollahi, "Raptor Codes," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 6, pp. 2551 - 2567, June 2006.
  - [102] P. Stavroulakis, "Terrestrial Trunked Radio - TETRA: A Global Security Tool," Springer, 2007.
  - [103] E. Steinbach, N. Färber, and B. Girod, "Standard Compatible Extension of H.263 for Robust Video Transmission in Mobile Environments," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 7, no. 6, pp. 872 - 881, Dec. 1997.
  - [104] T. Stockhammer, M. M. Hannuksela, and T. Wiegand, "H.264/AVC in Wireless Environments," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 7, no. 6, pp. 872 - 881, Dec. 1997.

- [105] T. Stockhammer, J. Hrvoje, and G. Kuhn, "Streaming Video Over Variable Bit-Rate Wireless Channels," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol.6, no.2, pp. 268 - 277, April 2004.
- [106] R. Storm, "Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik und statistische Qualitätskontrolle," 10. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig, 1995.
- [107] P. Stuedi, O. Chinellato, and G. Alonso, "Connectivity in the presence of Shadowing in 802.11 Ad Hoc Networks," at *IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2005*, New Orleans, 2005.
- [108] K. Stuhlmüller, "Modeling and Optimization of Video Transmission Systems, Dissertation, University Erlangen-Nuremberg, Juli 2000.
- [109] M. Sun and A. R. Reibman (editors), "Compressed Video over Networks", Marcel Dekker, 2001.
- [110] [Online] SVC Reference Software, online verfügbar unter: [http://ip.hhi.de/imagecom\\_G1/savce/downloads/SVC-Reference-Software.htm](http://ip.hhi.de/imagecom_G1/savce/downloads/SVC-Reference-Software.htm), zitiert: 07.05.2011.
- [111] T. Szigeti and C. Hattingh, "End-to-End QoS Network Design: Quality of Service in LANs, WANs, and VPNs," Cisco Press, 2004.
- [112] M. van der Schaar and P. A. Chou, "Multimedia over IP and Wireless Networks", Academic Press, 2007.
- [113] M. van der Schaar, S. Krishnamachari, S. Choi, and X. Xu, "Adaptive Cross-Layer Protection Strategies for Robust Scalable Video Transmission Over 802.11 WLANs," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Special Issue on Recent Advances in Wireless Multimedia, vol. 21, no. 10, pp.1752 - 1763, Dec. 2003.
- [114] M. van der Schaar and S. N. Sai, "Cross-layer wireless multimedia transmission: challenges, principles, and new paradigms," *IEEE Wireless Communications*, vol. 12, no. 4, pp. 50-58, Aug. 2005.

- 
- [115] M. van der Schaar and H. Radha, "A hybrid temporal-SNR Fine-Granular Scalability for Internet Video," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 11, no. 3, pp. 318 - 331, March 2001.
  - [116] M. van der Schaar and H. Radha, "Unequal Packet Loss Resilience for Fine-Granular-Scalability Video," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 3, no. 4, pp. 381 - 394, Dec. 2001.
  - [117] D. Vassis and G. Kormentzas, "Delay Performance Analysis and Evaluation of IEEE 802.11e EDCA in Finite Load Conditions," *Wireless Personal Communications*, Springer Verlag, 2005.
  - [118] M. Vetterli and J. Kovacevic, "Wavelets and Subband Coding," Prentice Hall, 1995.
  - [119] P. Vogel, "Signaltheorie und Kodierung," Springer, 1999.
  - [120] J.-P. Wagner and P. Frossard, "Playback Delay Optimization in Scalable Video Streaming," *Proc. of the International Conference on Multimedia and Expo ICME 2005*, Amsterdam, The Netherlands, 2005.
  - [121] B.H. Walke, S. Mangold, and L. Berlemann, "IEEE 802 Wireless Systems: Protocols, Multi-Hop Mesh/Relaying, Performance and Spectrum Coexistence," Wiley, 2006.
  - [122] J. Wall and J. Y. Khan, "An Adaptive ARQ Enhancement to support Multimedia Traffic using 802.11 Wireless LANs.," at *IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM 2004*, Dallas, USA, 2004.
  - [123] G. Wang, Q. Zhang, and W. Zhu, "Channel-adaptive error protection for scalable video over channels with bit errors and packet erasures," *Proc. of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, ISCAS 2002, Scottsdale, USA, 2002.
  - [124] Y. Wang, S. Wenger, J. Wen, A.K. Katsaggelos, "Error Resilient Video Coding Techniques," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 17, no. 4, pp. 61 - 82, July 2000.
  - [125] J. Watkinson, "The MPEG Handbook," 2<sup>nd</sup> Edition, Elsevier, 2004.

- [126] M. Weiser, "The Computer of the Twenty-First Century," *Scientific American*, vol. 265, no. 3, pp. 94 - 104, Sept. 1991.
- [127] S. Wenger, M.M. Hannuksela, T. Stockammer, M. Westerlund and D.Singer, "RFC 3984 – RTP Payload Format for H.264 Video," Standards Track RFC, Feb. 2005.
- [128] S. Wenger, Y. Wang and M.M. Hannuksela, "RTP payload format for H.264/SVC scalable video coding," *Journal of Zhejiang University – Science A*, vol. 7, no. 5, May 2006.
- [129] Wi-Fi alliance, "WMM specification, v.1.1," 2006.
- [130] T. Wiegand, G. J.Sullivan, G. Bjontegaard, and A. Luthra, "Overview of the H.264/AVC video coding standard," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 13, no. 7, pp. 560 - 576, July 2003.
- [131] T.Wiegand, H.Schwarz, D.Marpe, T.Schierl, und K.Grüneberg, "Skalierbare Videokodierung (SVC): Technologie und Anwendungen," 22. *FKTG-Jahrestagung*, Potsdam, 2006.
- [132] M. Winken, H. Schwarz, D. Marpe, and T. Wiegand, "Adaptive Refinement of Motion Information for Fine Granular SNR Scalable Video Coding", presented at *EuMob 2006*, Alghero, Italy, 2006.
- [133] S. Wiethölter and C. Hoene, "Design and Verification of an IEEE 802.11e EDCF Simulation Model in ns-2.26," TKN Technical Report TKN-03-19, TU Berlin, 2003.
- [134] B.E.Wolfinger, M. Zaddach, "Techniques to Improve Quality-of-Service in Video Communications via Best Effort Networks", Proc. of the IEEE Int. Conf. On Networking ICN '01, Colmar, France, 2001
- [135] D. Wu, Y. T. Hou, and Y. Zhang, "Transporting Real-Time Video over the Internet: Challenges and Approaches," *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, no. 12, pp. 1855 - 1875, Dec. 2000.
- [136] [Online] W Xiuchao, "Simulate 802.11b Channel within NS2," online available at [http://www.comp.nus.edu.sg/~wuxiucha/research/reactive/report/80211ChannelinNS2\\_new.pdf](http://www.comp.nus.edu.sg/~wuxiucha/research/reactive/report/80211ChannelinNS2_new.pdf), cited: 23.05.2009.

- 
- [137] X. Xu, M. van der Schaar, S. Krishnamachar, S. Choi, and Y. Wang, "Adaptive Error Control for Fine-Granular-Scalability Video Coding over IEEE 802.11 Wireless LANs," *Proceedings of the International Conference on Multimedia and Expo ICME 2003*, Baltimore, USA, 2003.
- [138] M. Zeller, „Echtzeitfähige Datenratenkontrolle für die Videokommunikation,“ Dissertation, TU München, 2004.
- [139] M. Zeller und M. Heidrich, "Adaptive Verfahren der Datenratenkontrolle für anwendungs- und netzübergreifende Videocodierung," *3. ITG-Fachtagung Netze und Anwendungen, Neue Kommunikations-Anwendungen in modernen Netzen*, Duisburg, 2002.
- [140] M. Zeller und M. Heidrich, "Anwendungs- und netzübergreifende Videocodierung: Adaptive Verfahren für die Datenratenkontrolle", *ITG-Workshop Breitbandige Zugangsnetze und integrierte Inhausnetze*, Berlin, 2002.
- [141] Q. Zhang, W. Zhu, and Y. Zhang, "Channel-Adaptive Resource Allocation for Scalable Video Transmission Over 3G Wireless Network," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 14, no. 8, pp. 1049 - 1063, Aug. 2004.
- [142] R. Zhang, S. L. Regunathan, and K. Rose, "Video Coding with Optimal Inter/Intra-Mode Switching for Packet Loss Resilience," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, no. 6, pp. 966 - 976, June 2000.
- [143] Y. Zhang, H. H. Chen, M. Guizani, „Cooperative Wireless Communications“, 1<sup>st</sup> Edition, Auerbach, 2009
- [144] M. Zhou, "Optimization of MPEG-2 video encoding," ISBN 3-8265-2817-4, Shaker, 1997.
- [145] [Online] ZigBee Alliance, online verfügbar unter: <http://www.zigbee.org>, zitiert: 07.05.2011.
- [146] M. Zink, „Scalable Internet Video-on-Demand Systems,“ Dissertation, TU Darmstadt, 2003.



## Lebenslauf

### Persönliche Daten

Name: Mike Heidrich  
Geburtsdatum: 28. Februar 1970  
Geburtsort: Görlitz

### Ausbildung

1976-1986 Zehnklassige polytechnische Oberschule „Geschwister Scholl“ Ostritz  
1986-1989 Berufsausbildung zum Maschinist mit Abitur (Note 1,1) im Braunkohlenkombinat Senftenberg (heute: Vattenfall Europe Mining)

### Wehr- und Zivildienst

1989-1990 Wehrdienst in Brandenburg und Potsdam  
1990 Zivildienst im Altenpflegeheim Ostritz

### Hochschulausbildung

1990-1995 Studium der Elektrotechnik in der Fachrichtung Automatisierungstechnik an der Technischen Hochschule Zittau, Abschluss: Dipl.-Ing (Note 1,2) verliehen durch die Technische Universität Dresden

### Berufliche Entwicklung

1995-1998 Projektingenieur bei der Pichler Engineering GmbH, München  
Jan. 1999-jetzt Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der Fraunhofer Gesellschaft, München,  
Aktuell ausgeübte Tätigkeit: Geschäftsfeldleiter Industrial Communication bei der Fraunhofer ESK, München